UNIVERSITY
OF
TORONTO
LIBRARY

DIE
KULTUR DER GEGENWART

IHRE ENTWICKLUNG UND IHRE ZIELE

HERAUSGEGEBEN VON PAUL HINNEBERG

DRITTER TEIL
MATHEMATIK · NATURWISSENSCHAFTEN MEDIZIN

DRITTE ABTEILUNG
ANORGANISCHE NATURWISSENSCHAFTEN

UNTER LEITUNG VON E. LECHER

DRITTER BAND
ASTRONOMIE

UNTER REDAKTION VON J. HARTMANN

VERLAG VON B. G. TEUBNER IN LEIPZIG UND BERLIN 1921

Astron
H

ASTRONOMIE

UNTER REDAKTION VON J. HARTMANN

BEARBEITET VON

L. AMBRONN · F. BOLL · A. v. FLOTOW · F. K. GINZEL · K. GRAFF · P. GUTHNICK
J. HARTMANN · J. v. HEPPERGER · H. KOBOLD · S. OPPENHEIM
E. PRINGSHEIM

MIT 44 ABBILDUNGEN IM TEXT UND 8 TAFELN

177231
2.1.23.

VERLAG VON B. G. TEUBNER IN LEIPZIG UND BERLIN 1921

COPYRIGHT 1921 BY B. G. TEUBNER IN LEIPZIG.

ALLE RECHTE, EINSCHLIESSLICH DES ÜBERSETZUNGSRECHTS, VORBEHALTEN.

VORWORT.

Die Stellung der Astronomie in dem Gesamtbilde unserer heutigen Kultur, also die von ihr im Laufe der Jahrhunderte ausgegangenen Einwirkungen auf die Gestaltung unseres Lebens und ihre jetzigen Beziehungen zu anderen Wissensgebieten in einer Übersicht über den Gesamtinhalt unseres gegenwärtigen astronomischen Wissens zusammenfassend zu behandeln, war eine besonders anziehende Aufgabe, zumal da die Sternkunde heutzutage vielen eine zwar ideale, aber weltfremde und nutzlose Wissenschaft zu sein scheint.

Bereits in seinen frühesten Anfängen wurde das Denken des Menschen durch die in erhabener Ruhe am Himmelszelt einherziehenden Gestirne mächtig beeinflußt: für Gottheiten wurden die unnahbaren Leuchten vielfach gehalten, Sonnen- und Sterndienst, Astrologie waren die erste Folge.

Doch auch für die Bedürfnisse des Lebens erwies sich die Beobachtung der Gestirne bald als nützlich. Hatte die Sonne — zunächst für den Menschen noch unbewußt — durch ihren regelmäßigen Tages- und Jahreslauf die Zeit in kleinere und größere Abschnitte eingeteilt, in denen sich alle Lebensfunktionen regelmäßig wiederholten, so leistete als erster „Teiler der Zeit", wie er bei den alten Völkern hieß, der Mond unschätzbare Dienste. Die gesamten heutigen Kalenderformen aller Völker sind in uralten astronomischen Beobachtungen und Einrichtungen begründet. Der durch den Wechsel von Tag und Nacht zuerst geregelte Zeitsinn des Menschen entwickelte sich weiter; der Tag wurde in kleinere Abschnitte geteilt, zunächst durch Beobachtung der Gestirne, später durch künstliche Hilfsmittel, Uhren, die, den immer weiter steigenden Anforderungen der genauen Zeitmessung entsprechend, zu hoher Vollkommenheit gebracht wurden. Unsere ganze Zeitmessung, die allen Verkehr regelt, beruht auf astronomischen Beobachtungen.

Noch in einer anderen Richtung wurde der menschliche Geist durch die astronomischen Erscheinungen gefördert. Wie der Zeitsinn, so hat sich auch der Raumsinn durch die Beobachtung der Himmelskörper immer weiter entwickelt. Von der ersten Orientierung bei weiten Wanderungen bis zu den Bedürfnissen der modernen Schiffahrt — immer erweisen sich die Gestirne als die getreusten Führer; Erd- und Himmelskugel wurden nach astro-

nomischen Beobachtungen eingeteilt. Nachdem einmal eine Vorstellung von der Kugelgestalt und Größe der Erde gewonnen war, streckte der Astronom seinen Maßstab auch hinaus in den Himmelsraum. Die Entfernung des Mondes und der Sonne wurde gemessen, die Bewegungen der Planeten, der Geschwister unserer Erde, verfolgt und erforscht. Manches mathematische Problem entwickelte sich aus den Anforderungen der „Mechanik des Himmels".

Nach Erfindung des Fernrohrs wandte sich der Wissenstrieb des Menschen auch der Untersuchung der physikalischen Verhältnisse der fernen Himmelskörper zu, doch erst die modernen Hilfsmittel, das Spektroskop, die Photographie und die exakte Helligkeitsmessung förderten unsere Kenntnisse in ungeahnter Weise. An die physische Erforschung der Körper unseres Sonnensystems, der Planeten, Kometen und unserer Sonne reihen sich die ausgedehnten Untersuchungen über die verschiedenen Körper des ganzen fernen Weltenraumes an. Hierauf wieder fußen die Forschungen über den Aufbau und die Bewegungen des ganzen Sternsystems.

Sind wir hiermit an die Grenzen unserer heutigen Raumvorstellung gelangt, in Fernen, aus denen selbst der schnelle Bote des Lichtes unser Auge erst in Hunderttausenden von Jahren erreichen kann, so kehren wir noch einmal auf unsere Erde zurück. Ein kurzer Abschnitt berichtet über die wichtigsten Hilfsmittel der astronomischen Beobachtungskunst und über die fortwährende Förderung, die wichtige Zweige der Technik, die Feinmechanik und die Optik, durch die Astronomie erfahren haben. In einem Schlußkapitel endlich werden alle die Versuche besprochen, die bis jetzt gemacht worden sind, um das große Grundgesetz der Mechanik des Himmels, die Gravitation, zu erklären, wobei die innigen Beziehungen der Astronomie zur Physik, ja zu unsern ganzen metaphysischen Vorstellungen zutage treten.

Das, in aller Kürze, waren die Richtlinien, nach denen der Plan des vorliegenden Bandes entworfen wurde. Vollständigkeit eines Lehrbuches wurde nicht erstrebt, besonders nicht in den Kapiteln, über die ausführliche Darstellungen bereits anderwärts vorliegen. Nur der Besprechung der Ergebnisse der modernen astrophysikalischen Fixsternforschung wurde ein erheblich breiterer Raum gewährt, einerseits weil noch keinerlei zusammenfassende Darstellung derselben vorhanden ist, andererseits weil gerade dieses Gebiet jetzt im Mittelpunkte des astronomischen Interesses steht, die größten Fortschritte aufzuweisen hat und auch für die zukünftige Ausdehnung unserer Kenntnisse von grundlegender Bedeutung zu werden verspricht.

Meinen Mitarbeitern, die sich mit großer Liebe der Ausarbeitung der einzelnen Kapitel hingaben, habe ich für ihre Hilfe herzlich zu danken, ganz besonders aber auch der Teubnerschen Verlagsbuchhandlung, die trotz der enorm gestiegenen Herstellungskosten die Vollendung und schöne Ausstattung des Bandes ermöglicht hat. Zwar war der Druck des Werkes in seinen

ersten Kapiteln schon vor dem Ausbruche des Krieges begonnen, jedoch sind diese mehr historischen Abschnitte der Veraltung nur in sehr geringem Maße ausgesetzt. In anderen Teilen des Werkes konnten nach dem heutigen Stande der Forschung entsprechende Änderungen und Nachträge angebracht werden, und das aktuelle Kapitel über die Physik der Fixsterne wurde erst in den letzten Monaten einheitlich ganz neu verfaßt, nachdem der zuerst für dasselbe gewonnene Mitarbeiter Prof. Fr. Ristenpart leider verstorben war. Ihm, wie dem inzwischen gleichfalls verstorbenen Bearbeiter der Physik der Sonne Prof. E. Pringsheim bewahren wir ein dankbares Andenken.

Möge dem Bande „Astronomie" der Kultur der Gegenwart eine gleich freundliche Aufnahme beschieden sein wie seinen Vorgängern auf anderen Gebieten der Wissenschaft.

Göttingen, im November 1920.

J. HARTMANN.

INHALTSVERZEICHNIS.

Seite

1. DIE ENTWICKLUNG DES ASTRONOMISCHEN WELTBILDES IM ZUSAMMENHANG MIT RELIGION UND PHILOSOPHIE 1
Von FRANZ BOLL.

2. DIE ZEITRECHNUNG 57
Von F. K. GINZEL.

3. DIE ZEITMESSUNG 92
Von J. HARTMANN.

4. ASTRONOMISCHE ORTSBESTIMMUNG. 138
Von LEOPOLD AMBRONN.

5. ERWEITERUNG DES RAUMBEGRIFFES 177
Von A. VON FLOTOW.

6. MECHANISCHE THEORIE DES PLANETENSYSTEMS. 216
Von J. VON HEPPERGER.

7. PHYSISCHE ERFORSCHUNG DES PLANETENSYSTEMS. 261
Von K. GRAFF.

8. PHYSIK DER SONNE 318
Von E. PRINGSHEIM.

9. PHYSIK DER FIXSTERNE 373
Von P. GUTHNICK.

10. DAS STERNSYSTEM 511
Von H. KOBOLD.

11. DIE BEZIEHUNGEN DER ASTRONOMIE ZU KUNST UND TECHNIK 566
Von L. AMBRONN.

12. DIE GRAVITATION 598
Von S. OPPENHEIM.

Namenregister 631
Sachregister 635

DIE ENTWICKLUNG DES ASTRONOMISCHEN WELTBILDES IM ZUSAMMENHANG MIT RELIGION UND PHILOSOPHIE.

Von

Franz Boll.

I. Religion und Himmelsbild. Dunkler Mächte Gewalt hält das Leben des primitiven Menschen in ihrem Banne. Mit tausend Armen langen von allen Seiten aus unheimlichem Dunkel die Dämonen nach ihm; alle die unbegriffenen Erscheinungen und Kräfte der Natur, die für ihn notwendig mit menschengleichem Willen begabt sind, umlagern ihn. Vor ihnen seine Kraft und seinen Besitz zu wahren, ihrer Tücke durch anderer Dämonen Hilfe und durch der Priester Zauberkunst zu begegnen, seinen Feind den vernichtenden Mächten zu überantworten — das sucht er vor allem zu erreichen, darauf ist die Wissenschaft seiner Zauberer gerichtet und seine aus der Furcht geborene Religion beschränkt. Noch haftet sein ganzes Tun am Boden; das Auge, das die Natur begabt hat, zum Himmel emporzuschauen, ist noch von der Erde und den unheimlichen Mächten, die in ihrer Tiefe hausen, gefesselt. Das heilige Dunkel, Urmutter Nacht, die selbst der Götterherrscher Zeus in der Ilias zu verletzen sich scheut, beherrscht mit dem Zwange der Furcht sein Gemüt. Die Vorzeit.

Es läßt sich eine Stufe nachweisen, wo die geistige Kraft des Naturmenschen noch nicht weit genug reicht, die Identität der Sonne, des Mondes und der Sterne, die ihm Tag um Tag und Nacht für Nacht erscheinen, zu durchschauen: jeden Abend entzünden sich die zahllosen Feuerfunken am Himmel wieder von neuem, und an jedem Morgen leuchtet ihm ein neues Licht dort droben, nicht bloß jedes Jahr, wie weithin im orientalischen und ägyptischen Kulturkreis, oder jedes kurze Weltalter, wie es der Mythus der Chichimeken in Mexiko und wieder nicht viel anders der nordische Mythus von der Verschlingung der Sonne durch Fenri und ihrer Wiedererstehung in ihrer Tochter zu erzählen weiß. Die Sprache hat urälteste Anschauung treu bewahrt, wenn sie noch jetzt vom „Neumond“ spricht und so den Mond alle vier Wochen einen anderen sein läßt; entsteht doch selbst noch für vorgeschrittene griechische Denker wie Xenophanes und Heraklit die Sonne jeden Tag neu aus brennen-

den Dünsten, und so auch der Mond und die Sterne. An der Bestätigung durch vermeintlich Beobachtetes schien es nicht zu fehlen; die Iberer im äußersten Westen der alten Welt glaubten mit eigenen Ohren zu hören, wie das Tagesgestirn zischend gleich einem glühenden Eisen in der Flut erlosch und versank — ganz wie ein moderner Denker es als Kindheitserinnerung erzählt, daß er noch als Knabe von vier oder fünf Jahren die Sonne zischen gehört, als sie scheinbar in einem großen Teich untertauchte, und deshalb von den Erwachsenen verlacht worden sei. So glaubte man auch vom Gipfel des hohen Idagebirges bei anbrechendem Tage zerstreute Feuerfunken zu sehen, die sich sammelten und zur Sonne zusammenballten, wie der große Dichter des Atomismus Lukrez zu erzählen weiß. Unzählige Male sieht der Mensch Stern um Stern in der Nacht aus der Höhe herabfallen; in kurzen Zeiträumen wechselt der Mond seine Gestalt und verschwindet mehrere Tage völlig vom Himmel, und manchmal zeigt sich das schauerliche Schauspiel, daß die helle silberne Scheibe des Mondes sich mit Blut erfüllt und die Sonne, die eben noch herabstrahlte, langsam aufgezehrt zu werden droht: wie sollte da, wenn die Sonne abends die Erde verläßt und das gefürchtete Dunkel heraufkommt, der primitive Betrachter sie stets ohne weiteres mit der leuchtenden Scheibe gleichsetzen, die am anderen Morgen im Osten wieder auftaucht? So wird sie noch im Mythus eines Kulturvolkes wie der Ägypter täglich von der Himmelskuh oder der Himmelsgöttin geboren.

Himmelsdecke und Himmelsgewölbe.

Dem modernen Menschen mag als die primitivste Vorstellung, zu der er sich noch ohne Mühe zurückzufinden vermag, die vom Himmelsgewölbe erscheinen, der Halbkugel zu unseren Häupten, an der die Sterne gleich glänzenden Nägeln befestigt um uns ihren nächtlichen Reigen ziehen. Die Vorstellung von der Veste des Himmels, dem Firmament, ist uns geläufig aus Bibel und Homer, und auch bei ganz primitiven Stämmen ist sie weit verbreitet, oft freilich in noch naiverer Auffassung, wie etwa im Glauben der rohen Mintiras auf Malakka der Himmel als ein großer Topf erscheint, der an einem Strick über die Erde gehalten wird. Bald ist dieses Gewölbe, durch dessen Spalten oder Fensterlöcher der Regen herabfällt, durch einen Felsen gebildet — „die Marmordecke schließt sich“ heißt es noch in Shakespeares Cymbeline (V 4), als Jupiter aufgestiegen ist — bald aus Stahl oder Bronze oder Glas. Aber nicht viel weniger verbreitet, namentlich auch in der ägyptischen und semitischen Kulturwelt, ist die Vorstellung des Himmels als eines großen Gewebes, eines Zeltes oder eines Mantels, der über die Erde ausgebreitet ist und in den als Ornamente die schimmernden Sternbilder eingewebt sind; der Astrolog wie der Kaiser trägt ein Abbild dieses Himmelsmantels zum Zeichen seiner Herrschaft über die Welt. Viel weiter vorgeschrittene Spekulation wird in diesem Himmelsmantel der Gottheit lebendiges Kleid erkennen und schließlich die zehn Himmel einer späteren kabbalistischen Sphärentheorie mit den zehn Vorhängen des Stiftzeltes gleichsetzen. Zwischen

Himmelszelt und Himmelsgewölbe steht in der Mitte das Welthaus mit seinen geschlossenen Mauern bei Babyloniern und Syrern.

Das alles ist noch fern von dem Gedanken an den Himmel über uns als eine Halbkugel, die dann einmal bei den Griechen ihre Ergänzung durch die untere Halbkugel findet. Auch bei Kulturvölkern wie den Ägyptern und in gewissen griechischen Vorstellungen ist vielfach der Himmel ein großer Strom, über den die Gestirne als Barken dahinziehen; und auch noch die der anthropomorphistischen Stufe der Gottesverehrung angehörige Vorstellung von Helios als dem ewigen Wanderer am Himmel oder dem Wagen der Sonne und des Mondes setzt offenbar zunächst keineswegs einen kugelgestaltigen Himmel voraus. Und ägyptische Vorstellungen wie die vom Himmel als einer großen Kuh, deren Beine auf der Erde stehen, oder einem Weibe, das sich mit Händen und Füßen auf die Erde stützt, führen wiederum durchaus nicht ohne weiteres zum Bilde einer Halbkugel. Alle diese Vorstellungen, die dem heutigen Menschen leicht als bloße dichterische Bilder erscheinen mögen, sind durchaus wörtlich zu nehmen, soweit es gilt, danach die bescheidenen Maße eines ursprünglichen Weltbildes zu ermessen. Der Himmel liegt für dieses noch keineswegs hoch über der Erde. Nach einer Sage der brasilischen Bakairi hat der Königsgeier die Sonne „gebracht“; er ist der Herr der Sonne, denn er kommt in ihre Gegend. Ja nach einer in allen Teilen der alten und neuen Welt weit verbreiteten Anschauung waren Himmel und Erde anfangs gar nicht getrennt, sondern fest aneinander gepreßt, so daß die Sonne sich nicht bewegen konnte, die Köpfe der Menschen am Himmel anstießen und Finsternis über der Erde lag. Fünf der göttlichen Söhne von Himmel und Erde vermochten sie nach einer bekannten Sage der Maori in Neuseeland nicht zu trennen; erst dem Gotte und Vater des Forstes gelingt es. Nicht höher also als die Wälder reichen, denkt sich diese Sage, die mit der Vorstellung vom Weltenbaum nichts zu tun hat, den Himmel über der Erde. Enge Welt.

Der Gedanke an große Weltkörper muß solchen primitiven Anschauungen unendlich fern liegen; für manche ist Sonne und Mond von Menschen gemacht. Auch viel weiter vorgeschrittene Völker denken noch nicht viel anders. Dem Verfasser der Schöpfungsgeschichte in der Genesis I 14 sind Sonne und Mond nur die beiden großen Lampen an der Veste des Himmels, die auf Erden leuchten und Licht und Finsternis scheiden sollen. Wie wenig sie das lebenschaffende Prinzip für die Erde darstellen, ist schon daraus ersichtlich, daß die Pflanzen, das junge Grün und die Bäume mit der Erde von Gott am dritten Tage, also vor jenen Leuchten, geschaffen worden sind. Dem Urmenschen aber ziehen Sonne, Mond und Sterne über den Himmel als Tiere hin, oder diese Tiere sind wenigstens die Träger der Gestirne. Den Bakairi waren Sonne und Mond zwar früher Feuer, wie die Etymologie der Worte ergibt, jetzt aber sind sie nichts weiter als Federbälle; am Abend werden sie mit einem großen Topf zugedeckt, der dann am Morgen wieder gelüftet wird. Die Wärme Kleinheit der Gestirne.

wird keineswegs überall mit der Sonne in Beziehung gebracht: als einst auf Erden ewiger Winter herrschte, wurde nach einer amerikanischen Sage der Sommer dadurch herbeigeführt, daß ein paar Tiere eine Öffnung durch den Himmel brachen und so die warmen Winde aus dem jenseitigen Himmelsland eindringen ließen. Es ist eine notwendige, aber oft zu wenig beachtete Schlußfolgerung, daß in Mythen, die auf diesem Standpunkt geschaffen sind, eine Unterscheidung zwischen meteorologischen und astralen Vorgängen ganz und gar nicht zu erwarten ist. Haben doch noch die babylonischen Hofastrologen und von ihnen abhängige griechische Schriftsteller trotz aller Aufmerksamkeit auf den Himmel zwischen rein atmosphärischen und astronomischen Verfinsterungen, d. h. zwischen Bedeckungen durch Wolken bei den in Mesopotamien sehr gefürchteten Gewitterstürmen und zwischen wirklichen Finsternissen keineswegs scharf unterschieden.

Behexung und Todesnot von Sonne und Mond.

Man begreift leicht, daß bei Anschauungen, wie den vorher erwähnten, jene Tiere oder glänzenden Bälle am Himmel ganz ebenso gut der Gefahr ausgeliefert sein müssen, der Gewalt der Dämonen und Zauberer zu unterliegen wie die Dinge auf der Erde. Noch heute befiehlt der südaustralische Wilde der Sonne stille zu stehen, bis er ans Ziel gekommen ist, genau wie Josua in der bekannten Stelle der Bibel. Es klingt grotesk für uns, wenn sich die Bakairi die Mondphasen und Finsternisse dadurch erklären, daß verschiedene Tiere die Gestirne fast oder ganz zudecken, oder ein Zauberer sich in einen blauschwarzen Vogel verwandelt und mit seinen Flügeln eine Zeitlang die Sonne beschattet. Aber nicht nur Melanesier und Australneger denken ganz ähnlich, sondern noch die griechische Volksanschauung des Altertums glaubt in allen Jahrhunderten daran, daß die thessalischen Hexen und Zauberer imstande seien, das leuchtende Auge, den Mond, vom Himmel herabzuziehen, wofür sie dann allerdings ihr eigenes Augenlicht einzubüßen pflegen; und ebenso leiteten die Scharen des kaiserlichen Feldherrn Stilicho das Schrecknis einer Mondfinsternis nicht von natürlichen Ursachen, sondern von den griechischen Hexen her, die die heranziehenden Goten begleiteten. Ein Zauberer der römischen Kaiserzeit besitzt noch das Rezept, einen herabschießenden Stern, der sich dann in eine göttliche Gestalt verwandelt, zu seinem Dienst bis an sein Lebensende und darüber hinaus zu zwingen. Unendlich zähe hält sich trotz des Eiferns christlicher Prediger die Auffassung, daß die Gestirne bei ihrer Verfinsterung krank sind und sterben wollen, von sichtbaren oder unsichtbaren bösen Mächten gequält; *luna laborat* „der Mond ist krank" sagten die Römer, und *„mon dieu qu'elle est souffrante"* klagten noch französische Bauern des 18. Jahrhunderts. Hunde ergreifen und zerfleischen den Mond: so erklären sich die Chiquitos in Südamerika die blutrote Färbung, die bei der Mondfinsternis häufig auftritt und wie nichts anderes die naiven Betrachter mit Furcht und Entsetzen erfüllt. Da also die Gestalten am Himmel von den gleichen dämo-

nischen Mächten gefährdet sind wie der Mensch auf Erden, so kommt man ihnen auch mit den gleichen Mitteln zu Hilfe wie einem kranken, d. h. verhexten Menschen; man scheucht bei den Finsternissen auf der ganzen Erde mit wildem Geschrei und Hundegebell, mit Trommelschlag, Metallklang und Pfeil- oder Gewehrschüssen die feindlichen Dämonen: *vince Luna* rief man im Mittelalter aufmunternd dem bedrohten Gestirn zu. Noch 1844 hat Ludwig Roß auf einer kleinen Insel bei Rhodos bei einer Mondfinsternis all den verzweifelten Höllenlärm und das wilde Schießen von Griechen und Türken beobachtet, „während gleichzeitig Männer, Weiber und Kinder unter dem Vortritt der Priester singend und betend in die Kapelle zogen, um den Beistand der Panagia und aller Heiligen für die heidnische Selene zu erflehen". Und jede Schilderung göttlichen Strafgerichtes und vor allem der Angst der letzten Tage vor dem Weltgericht, vom Propheten Joel, dessen Schreckensweissagung Petrus in der Apostelgeschichte II 19 wiederholt, bis zu den Flugblättern des 16. Jahrhunderts und darüber hinaus zeigt immer wieder, wie wenig die Menschheit in ihrer ungeheueren Mehrheit, trotz längst gegebener natürlicher Aufklärung des Vorgangs, es verlernen konnte, gleich der übrigen Kreatur zu zittern, wenn sich „die Sonne wandelt in Dunkel und der Mond in Blut".

Die Religion der Erde und des Himmels.

Und dennoch ist es schon ein ungeheuerer Schritt nach aufwärts gewesen, als die Menschheit, hier früher, dort später, begann, vom lichten Himmel, von Sonne und Mond und den freundlichen Sternen sich tröstlichen Glauben zu holen und darum der Sonne und dem Monde gegen die feindlichen Dämonen beizuspringen. Der Glaube an göttliche Wesen, die nicht mehr nur unheimlich und tödlich sind, sondern auch freundlich und hilfreich, hat freilich zuerst an der „Mutter Erde" oder an den „Müttern" tief unten in ihrem Schoß sich entwickeln können, die alles Gedeihen, allen Erntesegen, jedes neue Geschlecht der Menschen heraufsenden; aber das Grauen der Hölle liegt hier zu nahe, zu leicht verwandelt sich die alles gebärende Mutter Natur in die alles wiederum verschlingende Todesgöttin, „der Schauplatz des unendlichen Lebens in den Abgrund des ewig offenen Grabes". Vor diesem bei der Religion der Erde immer drohenden Zurücksinken in düstere Instinkte und halb überwundene Vorstufen seiner Entwicklung rettet den Menschen die Religion des Himmels. Die indogermanischen Stämme haben sie vor ihrer Teilung schon besessen; das ist einer der wenigen sicheren Reste, die von den Ergebnissen der vergleichenden Mythologie übriggeblieben sind. Die Indogermanen verehren weithin den Vater Zeus, Jupiter, Dyauschpitā und wie die verschiedenen Formen für den gleichen Namen in den einzelnen Sprachen sich ausgeprägt haben; es ist nach dem Wortsinn der Gott des lichten Himmels, und *divi*, „Himmlische", heißen die Götter überhaupt bei den Indogermanen: sie wohnen droben auf den Bergen oder über den Bergen wie die Gestirne, mit denen sie deswegen, wie man kaum zu

sagen braucht, durchaus nicht identisch sind, und sie tragen etwas von der lichten Helle des Tages in ihrem Wesen.

Man darf nun freilich nicht glauben, daß dieser Kultus des lichten Tagesgottes von vornherein bei den Indogermanen sich beherrschend in der Religion durchgesetzt habe: der Weg nur nach oben war gezeigt, aber er ist ungezählte Male und oft bis zum völligen Verschwinden verdunkelt worden. Nicht nur, daß Dyauschpitā in Wahrheit im Kultus bei den Indern gar wenig bedeutet, daß Zeus, der Gott des lichten Himmels, in Griechenland da und dort selbst zu den Mächten der Erdentiefe herabgezogen wird: auch das Wesen des Himmelsgottes als solchen muß keineswegs nur ein freundliches und gütiges sein. Von droben kommt auch der niederschmetternde Blitz, der vernichtende Hagelschauer, der wilde Wettersturm, die des Menschen Arbeit in wenigen Augenblicken zerstören und seine Hoffnungen vereiteln.

Sonnenkultus nicht überall von Belang.

Von den Gestirnen, die Tag und Nacht erhellen, treten Sonne und Mond überall naturgemäß am meisten hervor und stehen zueinander in irgendwelcher Beziehung, auf der anthropomorphistischen Stufe der Religion als Bruder und Schwester, als Mann und Weib, in Freundschaft und Feindschaft. Aber ihre Bedeutung in den einzelnen Religionen ist außerordentlich verschieden. In vielen ist sie durchaus nicht groß, und zwar gerade auf indogermanischem Gebiet; der Kultus des lichten Himmels muß von dem der Lichtträger scharf unterschieden werden. Der Sonnengott Surya ist im indischen Kultus noch weniger bedeutend als Helios (und ebenso Selene) im griechischen; und es ist nur Willkür, an Helios' Stelle Apollon einzusetzen, der zwar die Züge eines Lichtgottes trägt, aber weder nach seiner wahrscheinlich kleinasiatischen Herkunft, noch vollends nach seiner Entwicklung gerade in den großen Zeiten seiner Wirksamkeit als Sonnengott sich erweisen läßt. Die Griechen wollten nichts davon wissen, mit dem Sophisten Prodikos „Sonne und Mond und Flüsse und Wiesen und Früchte", kurz alles, was in der Natur dem Menschen Nutzen bringt, für die wahre Wesenheit ihrer Götter zu erklären. Sie hatten keine Neigung, ihre früh zu höchst persönlichen Wesen ausgestalteten Götter mit den Naturerscheinungen selbst gleichzusetzen, wie es manche antiken und modernen Mythologen ihnen zumuteten. Die fromme Empfindung, mit der sie dennoch die Wirkung göttlicher Kräfte in jenen Gestirnen erkannten, wird dadurch ebensowenig beeinträchtigt wie die Neigung ihrer Philosophen, gerade die Verehrung der „augenfälligen Götter" als den ältesten Kern auch der griechischen Religion vorauszusetzen. —

Sonnenkult bei den Griechen.

Sonnenkult bei den Germanen.

Den Germanen galten nach der berühmten Darstellung des Caesar Sonne und Mond neben dem Feuergott Vulkan als einzige Götter; aber die Gefahr willkürlicher Identifizierung liegt bei einem solchen Bericht eines fremden Schriftstellers nahe, um so mehr als Tacitus nichts davon weiß. Allein auch wenn man diese vielumstrittenen Worte dennoch für zuverlässig halten will, so wird man doch eingestehen müssen, daß jene Naturmächte auf

dem Übergang zu wirklichen Gottheiten stehen geblieben sein müßten. Ob das Julfest um die Wintersonnenwende überhaupt ein altgermanisches Fest gewesen ist, haben neuere Untersuchungen höchst zweifelhaft gemacht; aber auch wenn ein solches Mittwinterfest alt und allgemein germanisch war, so ist doch seine zeitliche Festsetzung auf den 25. Dezember, d. h. auf die in Caesars Kalender angenommene Wintersonnenwende, erst sekundär und dem Einfluß des christlichen Weihnachtsfestes zuzuschreiben. Das alte Mittwinterfest trug vielmehr wohl den Charakter eines allgemeinen Seelenfestes, mit dem sich der Befruchtungszauber verbindet. Da alle Jahreszeiten tatsächlich durch den Lauf der Sonne bestimmt sind, fällt es uns schwer, beides getrennt zu denken; aber die Wahrnehmung von Sommer und Winter geht bei jedem Volke der Beobachtung der Tag- und Nachtgleichen und der Sonnenwenden voraus. Die Kenntnis und Beobachtung der Solstitien und Äquinoktien haben die Germanen wohl erst durch die Römer erhalten. Die heiligen „zwölf Nächte“ sind christlichen Ursprungs, das Abbild des Dodekahemerons, d. h. der zwölf heiligen Tage zwischen Weihnachten und Epiphanias, dem neuen und alten Geburtstag Christi; und der erstere knüpft wieder an den *dies natalis Solis invicti*, den Geburtstag der Sonne, an, der unter ägyptischem und syrischem Einfluß im römischen Reich auf den 25. Dezember gesetzt wurde. Der Brauch der Johannisfeuer scheint zunächst bestimmt und ausschließlich genug auf die Sommersonnenwende hinzudeuten. Aber es ist wesentlich, daß die gleichen Feuer nicht nur zu Weihnachten, sondern auch am Martinifest (11. November) und am Walpurgistag (1. Mai), sowie zu Anfang oder zu Ende der Fastenzeit im Schwange sind, wo jeder astronomische Einschnitt im Sonnenlauf fehlt. Auch bei diesen Festen wurde mehrfach ein brennendes Rad oder auch brennende Körbe, Teertonnen, Reisigwellen den Berg hinabgerollt, „das gleich anzusehen ist, als ob die Sonne vom Himmel liefe“, oder brennende hölzerne Scheiben in der Luft geschlagen. Ursprünglich dienten diese Räder, die auch im Hagelzauber verwendet wurden, wie andere Vorrichtungen der Erzeugung des Feuers, das seinerseits die Reinigung, d. h. Dämonenvertreibung zum Zwecke hatte, gleich den Notfeuern, die man bei Pest und Viehseuche anzündete. Die Deutung dieser Räder auf die Sonne aber wird sich vielfach sehr frühe eingestellt haben, um so mehr als auch griechische Vorstellung die Sonne als Scheibe oder Rad bezeichnet hat. Je klarer man über den Zusammenhang der Wärme und Fruchtbarkeit mit dem Jahreslauf der Sonne wurde, desto mehr mußte man das Bestreben haben, die Scheibe oder das Rad, das man in Glut und rasche Bewegung brachte, der Sonne gleichzuachten und ihr so nach den Grundgesetzen des Analogiezaubers bei ihrem Jahreslauf nachzuhelfen. So ist es ganz wohl verständlich, daß auch die Lebensrute, mit der das Vieh beim Auszug, zur Fruchtbarkeitserzeugung, geschlagen wird, nach einer Sitte in der Grafschaft Mark vom Hirten an dem zuerst von der Sonne beschienenen Vogelbeerbaum abgeschnitten werden muß.

Mondkultus und Mondaberglaube.

Auch bei den zahlreichen Völkern, wo der Kultus der großen Himmelskörper stärker hervortritt, ist durchaus nicht immer unter diesen der Rang eingehalten worden, den wir ihnen unbedenklich zuerteilen würden. Das Bekenntnis des greisen Goethe, daß es „durchaus in seiner Natur liege, die Sonne zu verehren als eine Offenbarung des Höchsten, und zwar die mächtigste, die uns Erdenkindern wahrzunehmen vergönnt ist", daß er „in ihr das Licht und die zeugende Kraft Gottes anbete, wodurch wir leben und weben und sind, und alle Pflanzen und Tiere mit uns" — dieses Bekenntnis ist uns so natürlich, daß es zunächst wohl befremden mag zu hören, daß vielfach der Mond der Sonne im Kultus voranstand oder sogar, wie bei vielen Negerstämmen, nur er, nicht auch die Sonne, verehrt wird, und daß gerade das Wachstum ihm und nicht der Sonne zugeschrieben wird, die vielmehr als versengend und tötend gilt. Zwar scheint es nicht sicher, daß bei den alten Babyloniern Sin, der Mondgott, in früher Zeit der oberste Gott überhaupt gewesen sei, wenn er auch in einzelnen Hymnen als Vater der Götter gepriesen und mit den höchsten Göttern gleichgesetzt wurde. Allein sicher ist, daß gegenüber dem Mondgott der Sonnengott Schamasch in zweiter Linie stand; er ist der Sproß des Mondgottes Nannar, und er führt sogar den Namen „der Diener" oder „Untergebene", was man auf dieses sein Verhältnis zum Mondgott beziehen will. Es ist klar, daß diese Anschauung nur in einer Kultur entstanden sein kann, die von dem wahren Verhältnis zwischen Sonne und Mond, von dem entlehnten Licht des letzteren noch keine Ahnung hatte. Unter dieser Voraussetzung aber ist die Bevorzugung des Mondes vollkommen verständlich, vor allem in diesen südlichen Regionen. Da brennt die Glut der Sonne mitleidslos die Vegetation nieder und droht den lebenden Wesen mit Seuchen und Fieber, während der Mond den kühlenden Tau der Nacht mit sich bringt und mit seinem freundlichen Licht die Karawanen durch die Wüste geleitet. Auch ein anderer Umstand wirkt dabei wesentlich mit. Der Mond ist durch seinen raschen Umlauf und seine Phasen der gegebene erste Zeitmesser, wie denn auch schon sein Name in den indogermanischen Sprachen auf die Wurzel mē, messen hinweist. Darin ist er der Sonne weit überlegen; die Erkenntnis ihrer Jahrpunkte tritt, wie schon bemerkt, viel später ein als die Einrichtung eines Vegetationsjahres, das lediglich Sommer und Winter zu einer Einheit zusammenfaßte. Dagegen hat die Rechnung von Neumond zu Neumond überall die erste feste chronologische Orientierung geboten. Vegetabilisches und animalisches Leben scheint für primitive Anschauungen, die sich zum Teil bis in unsere Zeit gehalten haben, mit dem Mond in direktem Zusammenhang zu stehen; noch richtet man sich vielfach nach ihm beim Schneiden der Haare und der Nägel; die Hochzeit muß bei der Konjunktion oder wenigstens bei zunehmendem Mond stattfinden; Menstruation, Schwangerschaft, leichte oder schwere Entbindung schienen sich an den Mond anzuschließen, Pflanzen und Säen wird nach ihm eingerichtet,

Krankheiten mannigfacher Art, wie besonders die Epilepsie, scheinen mit ihm in geheimem Zusammenhang, und selbst die inneren Organe, auch die Augen, mancher Tiere müssen sich, wie noch Melanchthon und Tycho de Brahe glaubten und ohne alles Bedenken als Tatsache aussprachen, mit dem Monde vergrößern und verkleinern. Und daß die Gezeitenbewegung in der Tat, wie zuerst der große griechische Kaufmann und Entdeckungsreisende Pytheas von Massilia erkannte, mit dem Monde zusammenhängt, mußte diesem Glauben an die unmittelbare Einwirkung des Mondes auf die Erde auch bei den Gelehrten immer wieder Vorschub leisten. Es ist eine sehr bezeichnende Tatsache, daß die beiden Verteidiger der heliozentrischen Hypothese im Altertum und in der neuen Zeit, Seleukos und Galilei, die Erdrotation in die Erklärung der Gezeitenbewegung hereinzuziehen versuchten: die Abhängigkeit der Ebbe und Flut vom Monde galt eben als eine der Stützen des alten Weltbaues. — Wenn wir hören, daß auch bei den südamerikanischen Indianern der Mondkultus mehrfach vor dem Sonnendienst hervortritt, so mag es wohl sein, daß hier auch noch ein anderer Umstand mitwirkt. Dem Jäger, der auf nächtliche Beute auszieht, muß der Mond in der Tat sehr wichtig sein, während der Ackerbauer nicht nur des Tageslichtes, sondern auch der Wärme bedarf, die er nun mit dem Lauf der Sonne in Verbindung zu bringen gelernt hat. Wie alle ältesten Götter ist übrigens auch der Mond, selbst wo er in erster Linie verehrt wird, keineswegs immer gut; bei den nordamerikanischen Rothäuten hat der böse Geist seinen Sitz im Monde, und bei den Muyskas der Terra Firma im Norden Südamerikas ist er erst aus einem bösen Weib verzaubert, wie auch alle Zauberei bei den Griechen, den Germanen und anderwärts sich mit Vorliebe an den Mond, namentlich an den Vollmond, knüpft, der dabei hilfreich sein muß und durch seinen Tau die magische Kraft der Zauberkräuter verstärkt.

Vordringen des Sonnenglaubens.

Wenn die Sonne allmählich über den Mond Herr zu werden beginnt, so trägt dazu, wenigstens in Babylonien, nicht wenig die beginnende Astronomie bei; entscheidend ist die freilich erst spät durchdringende Erkenntnis, daß der Mond sein Licht von der Sonne empfängt. Vom Osten her wird in geschichtlicher Zeit die Sonnenreligion allmählich nach Westen übertragen, auch nach Griechenland, wo sie zugleich mit der Astrologie vorzudringen beginnt, seitdem durch Alexanders Züge der Orient erschlossen und damit die große griechische Weltkultur des Hellenismus in die uralten Länder des Ostens, aber auch orientalische Anschauungen nach Westen getragen werden; und wiederum vom Osten dringt der Sonnenkultus in das ganze römische Reich und gewinnt hier zuletzt über alle anderen die Oberhand, so daß eine ganz konsequent durchgebildete Sonnentheologie entsteht, die den Sonnengott nicht nur als Führer und Herrscher aller übrigen Gestirne erscheinen läßt, sondern auch als den Ordner der Jahreszeiten, den Lenker des Alls, den eigentlichen Zentralgott, wie ihn Kaiser Julian in seiner Rede auf den König Helios verherrlicht. Damals

war auch die Zeit, die mancher Mythologe wieder erneuern möchte, der nach einem treffenden Wort Welckers „die Krankheit hat, in jeder mythischen Person, worauf er sein Auge richtet, die Sonne zu sehen". Denn damals wurden wirklich alle großen Götter mit der Sonne ausgeglichen, und was von ihrem Mythus irgend sich dazu hergab, als solares Geschehen gedeutet.

Ägyptischer Sonnenkult.

In der alten wie in der neuen Welt — in Amerika ganz besonders im Reich der Inkas und bei den Ureinwohnern von Mexiko — hat der Sonnendienst weithin eine sehr bedeutsame Rolle gespielt. Am anschaulichsten tritt er uns in Ägypten entgegen. Hier, wo alles Heil sich an den Nil, und wiederum dessen Erscheinen an bestimmte Jahreszeiten knüpfte, konnte unmöglich der Mond, nach dessen Monaten sich das Schwellen des Flusses nicht berechnen ließ, sondern nur die Sonne in den Vordergrund treten. Die Zeit aber, in der der Nil zu steigen beginnt, ist eben die, in der die Sonne am heißesten niederzubrennen anfängt. So ist die Verehrung der Sonne für die Ägypter durch natürliche Verhältnisse geradezu geboten. Der Sonnengott ist der Gott schlechthin; er ist hier der erstgeborene Gott, der zuerst aus dem Chaos oder aus der im Urwasser entstandenen Lotosblume oder dem Weltei emporsteigt; er hat sich selber geschaffen und seinen Namen dazu, was dem Ägypter nicht weniger bedeutet als das Wesen selbst. In seinem Schiffe fährt er über den himmlischen Ozean, wie der ägyptische König auf dem Nil, siegreich triumphierend über alle Feinde, vor allem die Wolken- und Gewitterschlange Apophis; und in der Nacht durchzieht er auf seiner Abendbarke die Unterwelt, wo ihn die Verstorbenen jubelnd begrüßen und ihm ihre Wünsche sagen: „er hört die Gebete derer, die in den Särgen liegen, und vertreibt ihr Leid und verjagt ihr Böses; er gibt ihren Nasen wieder Atem." In der uralten Stadt Heliopolis (On) war die Hauptstätte seiner Verehrung. Gerade der Reformator der ägyptischen Religion, Amenophis IV., der den Kultus des Amun-Re, wenn auch nur für kurze Zeit, gestürzt hat, führt vor allem wieder den alten Sonnengott zurück, aber unter einem neuen Symbol, im Bilde der Sonnenscheibe, deren Strahlen unten in Hände auslaufen, die Lebenskreuze darreichen. Aus dem Kultlied des neuen Gottes, der nicht bloß der oberste, sondern der einzige werden sollte, mögen einige Sätze die religiöse Stimmung des Sonnenanbeters eindrucksvoll vermitteln: „Du erscheinst schön im Horizonte des Himmels, du lebende Sonne, die zuerst lebte. Du gehst auf im östlichen Horizonte und erfüllst die Erde mit deiner Schönheit. Du bist schön und groß und funkelnd und hoch über der Erde. Deine Strahlen umarmen die Länder, soviel du geschaffen hast ... Gehst du unter im westlichen Horizonte, so ist die Erde finster, als wäre sie tot. Sie schlafen in ihren Kammern mit verhülltem Haupt. Ihre Nasen sind verschlossen, und kein Auge sieht das andere. Stähle man ihre Habe, die unter ihrem Kopf liegt, sie merkten es nicht. Jeder Löwe kommt aus seiner Höhle heraus,

und alles Gewürm beißt ... Die Erde schweigt: der sie schuf, ruht ja in seinem Horizonte. Frühmorgens gehst du im Horizonte auf und leuchtest als Sonne am Tage. Die Finsternis flieht, wenn du deine Strahlen spendest. Die Bewohner Ägyptens sind fröhlich; sie erwachen und stehen auf den Füßen, wenn du sie erhoben hast. Sie waschen ihren Leib und greifen nach ihren Kleidern. Sie erheben ihre Hände, dich zu preisen. Das ganze Land tut seine Arbeit. Alles Vieh ist zufrieden auf seiner Weide. Die Bäume und Kräuter grünen, die Vögel flattern in ihren Nestern und heben ihre Flügel, dich zu preisen. Alle Tiere hüpfen auf ihren Füßen; was da flattert und fliegt, lebt, wenn du für sie aufgehst. Die Schiffe fahren hinab und ebenso hinauf; jeder Weg steht offen, weil du aufgehst. Die Fische im Strom springen vor deinem Antlitz, deine Strahlen dringen in das Innere des Meeres ... Du schufst die Jahreszeiten, um all dein Erschaffenes zu erhalten, den Winter, um sie zu kühlen, die Glut, damit sie dich kosten. Du schufst den fernen Himmel, um an ihm zu strahlen, um all dein Erschaffenes zu sehen. Du schufst die Erde für die, die aus dir allein entstanden sind, die Hauptstädte, Städte, Stämme, Wege und Ströme.“ Vielleicht hat der Hymnus, von dem nur ein Teil hier wiedergegeben ist, gerade darum für uns etwas besonders Packendes, weil diese neue ägyptische Theologie gleich der von demselben König begünstigten Kunst die hieratische Gebundenheit zugunsten eines lebendigen Naturbildes aufzugeben versuchte; aber auch die strengeren Worte, in denen die frühere Zeit den Sonnengott verherrlichte, sind für uns zum größten Teil noch von unmittelbarer Verständlichkeit und Wirkung, wenn dort auch die kultische Persönlichkeit des Gottes mit seinen Beinamen stärker hervortritt als hier, wo so offenbar gerade die physische und soziale Wirkung der Sonne selbst betont wird.

Aufgang und Untergang.

Wo der Einfluß der Sonnenreligion hindringt, auch ohne dominierende Bedeutung zu erlangen, da müssen gewisse Formen des Kultus und der Weltanschauung von selbst entstehen, die auch für uns so wenig abgestorben sind, daß wir sie noch lebendig mitempfinden können. Der Aufgang des Sonnengottes, der nun als Vater und Erneuerer alles Lebens erkannt ist, bringt alle Förderung auch des menschlichen Daseins mit sich; das Tagesgestirn erhält nicht nur alles am Leben, es schaut auch als ein allwissender Richter alles, was auf Erden vorgeht, und es bringt Kultur, Jahresordnung und Weisheit zu vorher rohen Wilden. Darum werden Sonne und Mond bei Naturvölkern geradezu als Namen für die Kulturheroen gebraucht, oder der Kulturheros ist wenigstens der Sohn des Sonnengottes. Empfindungen ursprünglichster und lebendigster Art erwachen mit dem Sonnendienst zu voller Klarheit. Nichts ist verbreiteter und natürlicher als der Gegensatz zwischen Aufgang und Untergang; von dort kommt das Licht und der Tag, von da die Nacht und das Grauen herauf; wo die Sonne aufgeht, ist Leben, wo sie untersinkt, ist der Tod. Wenn der junge Pompeius dem alternden Sulla sagt: „Die Menschen wenden sich lieber der

aufgehenden als der untergehenden Sonne zu", so empfängt das Wort erst aus diesem zwingenden Gefühl seine ganze hochmütige Bitterkeit. Bei den Griechen reagiert das religiöse Empfinden gegen ein Begräbnis und eine Hinrichtung vor Sonnenuntergang; man zeigt dem Gott des Lebens keinen Leichnam, wie Teiresias in der Antigone dem frevelnden König zu bedenken gibt. Solon hatte befohlen, daß vor Sonnenaufgang der Tote bestattet werde — es pflegte in der Morgendämmerung zu geschehen —; so verlangt wieder der greise Platon in seinen Gesetzen, daß eine Leiche vor Tagesanbruch aus der Stadt sein müsse, und so ordnet noch der Kaiser Julian ein Jahrtausend nach Solon die Bestattung zwischen dem Untergang und dem Aufgang der Sonne an. Den Göttern opfert man am Vormittag, den Heroen und den Toten am Nachmittag. Sokrates verrichtet zu der aufgehenden Sonne sein Gebet, nicht anders als der Brahmane „mit nachahmendem Tanz" die aufsteigende Sonne des Morgens begrüßt. Und noch heute wird man weithin in christlichen Ländern, als ob sich das ganz von selbst verstünde, der Sitte begegnen, Begräbnisse nur am Nachmittag abzuhalten, während für die Messe in der katholischen Kirche umgekehrt ausschließlich der Vormittag vorbehalten ist, mit der um so eindrucksvolleren und verständlicheren Ausnahme der Weihnachtsmette, die die Wiederkehr des *Sol justitiae*, der Sonne der Gerechtigkeit, in die bange Nacht der Erwartung feiert. — Auch alles Land auf Erden ist im Grunde des Sonnengottes Eigentum. Daran erinnert das merkwürdige deutsche Wort Sonnenlehen, wie es Jakob Grimm gedeutet hat; und jenes Wort des Ampsivarierhäuptlings Boiocalus in Tacitus' Annalen (XIII 55), der an die Sonne und die übrigen Gestirne die Frage richtet, ob sie den unbebauten Boden anschauen wollten, ist nicht eine pathetische Redewendung, sondern entspringt, wenn es auch keinen förmlichen Kultus der Sonne beweist, doch einem starken natürlichen Verhältnis zu den sichtbaren himmlischen Mächten, den leuchtenden Herren am Himmel.

Orientation.

Wer gewohnt ist, mit seinem Gebet sich an die aufgehende Sonne zu wenden, der wird wohl auch, wenn er einen Tempel schafft und selbst wenn er eine Stadt erbaut, nicht vergessen, die Richtung im Einklang mit dem Aufgang der Sonne zu wählen oder, wie wir noch jetzt sagen, sie zu „orientieren". Die wichtigste Art der Orientierung des Menschen im Weltall ist nun freilich der Kalender, der den Menschen über die Unbestimmtheit des primitiven Daseins erhebt und ihn durch die Regelung der Götterfeste und die Ordnung seines bürgerlichen Lebens in ein doppeltes festes Verhältnis zu den überirdischen Mächten stellt. Neben diese Orientierung in der Zeit, von der der nächste Abschnitt dieses Buches zu sprechen hat, tritt auch eine Orientierung im Raum, nach den Himmelsrichtungen. Freilich sind die sicheren Ergebnisse der Orientationsforschung noch nicht allzu zahlreich, wenn auch einiges schon jetzt festzustehen scheint. In Peru sind Sonnensäulen nachgewiesen, auf die bei den Äquinoktien und Solstitien der goldene Thron der Sonne gesetzt wurde. Und

ebenso viele fanden sich in Zentralamerika und auf den Antillen; und im Hauptsonnentempel der Inkas in Cuzco war an der Altarwand im Westen, also gegenüber dem östlichen Tore, das Antlitz der Sonne angebracht, so daß am Morgen die Sonne das Sonnenbild bestrahlte. Aber wo man am meisten begierig wäre, eine Orientation der Tempel, sei es nach der Sonne oder vielleicht nach einzelnen wichtigen Sternen, zu erkennen, im Euphratland, fehlen leider die nötigen Messungen. Auch für Ägypten sind die einigermaßen zuverlässigen Ergebnisse noch dürftig; die ägyptischen Tempel sind, wie der unermüdliche Erforscher der Orientation, Heinrich Nissen, selbst ausspricht, nach allen Richtungen der Windrose gewendet, und es ist auch ihm noch nicht gelungen, diese Verschiedenheit befriedigend zu erklären. Der Nil wird sicherlich auf die Richtung ebenfalls eingewirkt haben. Immerhin scheint es, daß der größte ägyptische Tempel, das Heiligtum des Amun in Theben, nach dem Sonnenuntergang bei der Sommerwende orientiert ist. Die phantastischen Folgerungen, die manche moderne Schriftsteller besonders in England aus den Maßen der Pyramiden, mit reichlicher Verwendung willkürlicher Faktoren, gezogen haben — man fand durch die Größenverhältnisse der Cheopspyramide für die alten Ägypter nicht bloß die Kenntnis der Ludolfischen Zahl bis auf fünf Dezimalen, sondern auch einen guten Mittelwert des Abstandes der Erde von der Sonne, das spezifische Gewicht der Erde und die Kenntnis der Polarachse der Erde „bewiesen" —, diese Folgerungen zeigen, wie schlüpfrig die Wege sind, die man hier betritt. Sicher scheint die Orientierung bei den zwei syrischen Sonnentempeln von Baalbek und von Palmyra, die beide genau nach Osten orientiert sind. Auch bei einzelnen griechischen Tempeln hat sich Übereinstimmung zwischen der Richtung und dem Tage des Festes ergeben, so bei der Achse des Parthenon, die sich mit dem Tag des Panathenäenfestes auffallend gut zu vertragen scheint. Merkwürdig ist es, wie in später Zeit beim Bau von ganzen Städten eine feste Orientierung durchgeführt wurde: die rechtwinklige Stadtanlage, wie sie der Baumeister und politische Theoretiker Hippodamos von Milet gefordert und schon zu Perikles' Zeit im Piräus und in der Kolonie Thurii durchgeführt hatte, steht uns jetzt am eindruckvollsten vor Augen in der kürzlich ausgegrabenen Stadt Priene in der Nähe von Milet, die gegen 334 v. Chr. neu gegründet wurde. Acht ostwestliche flache und sechzehn nordsüdliche steile Straßen durchziehen die Stadt; auf dem Mittelpunkt des Marktes, wo der Staatsaltar des Zeus stand, kreuzen sich die achte Steilstraße und die vierte flache Straße, cardo und decumanus nach der Terminologie der römischen Feldmesser. Es ist merkwürdig, mit welcher Energie man die natürlichen Hindernisse, große Felsmassen, die sich diesem streng schematischen Straßennetz entgegenstellten, weggesprengt und zahllose Treppenstufen angelegt hat, um die Steilwege zu ermöglichen. Man kann es sich bei dieser und den verwandten Anlagen schwer vorstellen, wie eine solche keineswegs durch die Natur der Örtlichkeit ohne

weiteres gegebene Regelmäßigkeit anders als durch theoretische Erwägungen herbeigeführt wurde, die zuletzt doch nicht bloß auf künstlerischem, sondern auch auf religiösem Untergrund beruhen werden. Weit fraglicher als diese in einzelnen Fällen sehr bestimmt entgegentretende Beachtung des wechselnden Sonnenaufgangs ist eine Orientierung nach dem Aufgang und vollends nach dem Untergang einzelner ausgezeichneter Sterne; nur sehr selten läßt sich irgendwelche Beziehung zwischen dem betreffenden Stern und der Gottheit, der der Tempel geweiht war, auch nur wahrscheinlich machen. Für die christlichen Kirchen ist die Regel, daß der Chor mit dem Hochaltar im Osten, der Eingang im Westen liegen müsse. Man muß dabei allerdings nicht schlechtweg an den Osten und Westen denken, vielmehr an einen Spielraum von 75^0 und darüber zwischen der Sonnenaufgangsstelle am kürzesten und am längsten Tage. Wie die Gotteshäuser, so orientiert man auch die Gräber meist nach Osten, im Christentum wie im Heidentum. Das Gebet wurde bei den Christen nach wie vor gen Osten gerichtet; die Fortdauer dieser Sitte selbst ist wichtiger als die Rechtfertigungen der Kirchenväter, die das natürliche Bedürfnis, weil es dem heidnischen Brauch entspricht, zu einer bloßen Symbolik abschwächen wollen, dann aber zu dem besseren Auskunftsmittel greifen, die vier Kreuzarme mit den vier Himmelsrichtungen zu verbinden. Immer bleibt der Westen der Anfang der Nacht und des Todes, der kalte, lichtlose Norden aber die Heimat des Dunkels, des Greisenalters, der Sünde, des bösen Feindes; dort ist für Dante das Tal der Furcht, das das Leben der Sünde darstellt.

Stonehenge. In die graue Vorzeit unseres Erdteiles könnte die Orientation ein helles Licht werfen, wenn weitverbreitete Anschauungen über gewisse, im Norden vorkommende Steindenkmäler zu Recht beständen. Das wichtigste und bekannteste von allen ist jene mächtige Anlage von vier konzentrischen Steinkreisen an der Heerstraße von London nach Bristol, neun englische Meilen nördlich von Salisbury, die man mit dem Namen Stonehenge (= Steingehänge) bezeichnet. Es ist das ein gewaltiges Steindenkmal von 30 m Durchmesser; in einem Abstand von wieder 30 m umgibt es ein flacher Wall mit äußerem Graben. Der äußerste Kreis besteht aus 30 Pfeilern von ca. 5 m Höhe, die oben durch horizontale Balkenlagen verbunden waren und teilweise noch sind; dann folgt ein zweiter Kreis von niedrigeren Steinen, dann fünf hufeisenförmige mächtige Trilithen (je zwei Steine durch einen daraufliegenden gebunden); endlich noch ein Ring von kleineren spitzigen Steinen. Ziemlich in der Mitte liegt jetzt flach am Boden ein gewaltiger Stein, den man gewöhnlich als Altarstein bezeichnet; bei genauerem Zusehen scheint es freilich, daß er ursprünglich aufrecht stand, also kein Altar, sondern eine Stele gewesen und nur zufällig beim Umfallen in seine jetzige Lage geraten ist. Tritt man nun am Morgen der Sonnenwende auf ihn und richtet den Blick auf einen außerhalb des ganzen Bauwerks liegenden Stein, so steht dieser genau unter der

aufgehenden Sonne. Es ist danach wohl zu verstehen, daß man auf den Gedanken eines Sonnentempels gekommen ist, dessen Alter freilich sehr erstaunlich wäre; denn die Prähistoriker setzen die Anlage auf etwa 2000 v. Chr., und die primitiven Steinwerkzeuge, mit denen man diese bis 7 m hohen Steinriesen an der einen Seite höchst sorgfältig behauen hat, faustgroße Äxte und Hämmer aus Flintstein, hat man bei der Grabung von 1901 gefunden. Allein von anderen Schwierigkeiten abgesehen, weist vor allem die Anlage zahlreicher verwandter Denkmäler, zum Teil in nächster Nähe, unter denen man Gräber gefunden hat, darauf hin, daß es auch bei Stonehenge sich um ein gewaltiges Grabdenkmal aus vorgeschichtlicher Zeit handelt, in dessen Nähe höchst merkwürdigerweise eine große und eine kleine Rennbahn sich zu finden scheinen: der letzte Bearbeiter hat dafür an die homerischen Leichenspiele erinnert, die mit dem Heroenkult aufs engste zusammenhängen. Die Fragen sind noch weiterer Klärung vor allem durch exakte Grabungen bedürftig; jedenfalls kann der Gedanke an einen Sonnentempel, dem auch der Archäologe Arthur J. Evans und der Naturforscher John Lubbock widersprochen haben, nur als sehr wenig wahrscheinlich bezeichnet werden; wenn die Mehrzahl der Gräber des Altertums in der Tat orientiert gewesen zu sein scheint, so wird man auch für die Tatsache der Orientierung von Stonehenge eines in so früher Zeit so außerordentlich unwahrscheinlichen Tempelbaues entraten können. Unter allen Umständen sollte man das mythische Volk der Hyperboreer — das lichte Nordvolk des Apollo über dem Götterberg im Norden — bei den Erklärungsversuchen einstweilen lieber ganz aus dem Spiele lassen.

Kult der übrigen Sterne.

Neben Sonne und Mond spielen die übrigen Sterne, wie von vornherein zu erwarten ist, im Kultus überall nur eine weit unbedeutendere Rolle. Denn keiner von ihnen kann mit den beiden Lichtern, wie die Griechen Sonne und Mond nannten, ernstlich in Wettbewerb treten; es sei denn der Planet Venus, der Morgen- und Abendstern, der vielfach im Süden sogar den ganzen Tag über sichtbar bleibt und dessen Licht dort stark genug ist, Schatten zu werfen. So tritt der strahlende Planet bei den Babyloniern unmittelbar neben Sonne und Mond; und auch vielfach anderwärts, z. B. bei den alten Mexikanern, hat er besondere Beachtung gefunden, während der schwer zu beobachtende Merkur sehr zurücktritt. Bei dem Mars mußte seine rote Farbe, beim Jupiter sein heiterer Glanz, beim Saturn sein langsamer Gang frühzeitig die Aufmerksamkeit erregen und die Phantasie beschäftigen. Der Saturn ist von den Babyloniern als „Stern der Sonne“ ausgezeichnet worden, eine bei dem wenig lichtstarken Stern doppelt auffallende Bezeichnung, für die schon mancherlei Gründe vermutet worden sind: vielleicht darf man glauben, daß man einst in diesem Planeten sich die Sonne selbst in weiter nächtlicher Ferne gedacht habe. Wie sich die Planeten allmählich mit Sonne und Mond zur Siebenzahl zusammenschließen, um dann in der römischen Kaiserzeit als Tagesgötter eine bedeutsame Rolle zu spielen, wird später kurz zu berühren sein.

Von der unermeßlichen Menge der Fixsterne hat nur eine Anzahl von solchen, die durch irgendwelche Besonderheit die Aufmerksamkeit auf sich zogen, im Kultus der Völker einige Beachtung gefunden. Der hellste Fixstern des Himmels, der Sirius, mußte nicht nur durch seinen Glanz, sondern auch durch die Zeit seines Frühaufganges bei der stärksten Hitze, vor allem in Ägypten, wo dieser mit dem Steigen des Nils zusammentraf, die Aufmerksamkeit erregen; eine der seltenen Tatsachen wirklichen Sternkultus in Griechenland gilt ihm: auf der Insel Keos begleitete man den Aufgang des Hundssternes geradeso wie die Verfinsterungen der Sonne und des Mondes mit Waffengetöse, offenbar zunächst zu dem Zweck, seinen fieberbringenden Einfluß abzuwehren. Das auffällige Siebengestirn der Pleiaden hatte in dem Hauptsonnentempel der Inkas gleich der Venus eine besondere Kapelle. Der große Bär und wohl auch beide Bären waren im Zauberglauben der hellenistisch-ägyptischen Mischkultur von besonderer Bedeutung, was auf ihre Stellung nahe am Pol zurückgeht, von wo aus der ganze Kosmos bewegt wird. Das beruht auf einer freilich noch sehr einfachen astronomischen Beobachtung, wie sie Jägern und besonders Seefahrern im Interesse ihrer Orientierung nahe liegen mußte: und doch haben die Griechen erst durch Thales' Vermittlung von den Phönikern gelernt, sich bei ihren Fahrten nach dem kleinen statt nach dem großen Bären zu richten. Bei den Arabern, die den Sternenhimmel mit besonders großer Aufmerksamkeit durchforschten, hat das kleine Sternchen über der Deichsel des Wagens, das wir im Deutschen den Reiter oder Fuhrknecht oder Hans Dümke (Däumling) nennen, eine besondere Aufmerksamkeit auf sich gezogen, nicht nur als Prüfstein guter Augen; der Herr dieses Sternchens, das Al-suhā, der Vergessene, hieß, wurde auch gegen Skorpionen und Schlangen angerufen, ihm also eine eigene Zaubermacht zugeschrieben. Das untergeordnete Verhältnis freilich, das dem kleinen mächtigen Stern und seinem Herrn dennoch gegenüber dem großen Himmelslicht ziemte, sprach ein persischer Dichter mit den Worten aus: „Fürwahr, wenn die Sonne erscheint, was vermag der Suhā weiter als sich zu verbergen!"

Der Einfluß der Fixsterne auf das Wetter.

Noch mancher andere einzelne Stern ist da und dort im Volksglauben und in der Religion stark hervorgetreten; manche freilich erst durch eine genauere Kenntnis des Weges der Sonne, wie der Regulus, der Königsstern (babylonisch Scharru = König) an der Brust des Löwen, der hellste Stern der Ekliptik, der daher in der Astrologie eine besonders große Rolle als der Verkündiger königlicher Macht und Herrschaft spielte. Vor allem aber ist es die Bedeutung der Fixsterne für den Kalender und für das Wetter, was die Aufmerksamkeit immer auf sie gerichtet hielt. Die jährlichen Aufgänge und Untergänge einer Anzahl von bemerkenswerten Fixsternen, wie des Sirius, des Arkturos, der Pleiaden, der Capella u. a., geben nicht nur die Anfänge der Jahreszeiten — so bestimmte für Eudoxos der Frühaufgang des Hundssternes den Beginn der Erntezeit, der Früh-

aufgang des Arktur den Anfang des Herbstes, der Frühuntergang der Pleiaden den Anfang des Winters —, sondern sie übten auch nach weitverbreitetem frühen Volksglauben, dem auch manche Gelehrten wie Ptolemaios zustimmten, einen bestimmenden Einfluß auf das Wetter unmittelbar vorher und nachher aus. Andere leugneten das freilich, weil sie die Fixsterne für viel zu weit entfernt ansahen, um eine solche Wirkung auf die Erde anzunehmen, und bedienten sich ihrer höchstens als Anzeichen für den voraussichtlichen Wetterumschlag; aber viel weiter verbreitet war sicher von Homer bis auf die späteste Zeit in Griechenland die Meinung, daß jene mächtigen Sterne selbst unmittelbar auf die Witterungsvorgänge einwirken. Wenigstens die Pleiaden spielen dieselbe Rolle auch bei australischen Stämmen, die nicht nur Regen und Frost, sondern sogar die Sonnenwärme ihnen — nicht der Sonne — zuschreiben. Man wird das sehr leicht verstehen können, wenn man sich der oben erwähnten ursprünglichen Anschauung erinnert, die Vorgänge im Luftraum von den stellaren noch keineswegs zu trennen vermochte, sondern alles, was „droben" ist, ebenso gut als eine Einheit zum „Himmel" zusammenfaßte wie das Untere als die Einheit der „Erde".

Beseelung und Göttlichkeit der Gestirne.

Wenn nun die Sterne eine Wirkung ausüben sollen, so ist damit für ursprüngliche Anschauungen zugleich ausgesprochen, daß sie Lebenskraft haben müssen, daß sie also beseelt und von göttlicher Macht sind. Und in der Tat sind wohl bei den meisten Völkern, die sich über eine gewisse niedere Kulturstufe zu erheben begannen, die Sterne insgesamt als beseelte und göttliche Wesen angesehen worden, ohne daß man ihnen deshalb schon einen Kult zu widmen brauchte. Wie hätte es auch anders sein können! Nicht nur ihre feste Ordnung in unendlicher Fülle und ihr wunderbarer Glanz, der vor allem in den dunstfreien Nächten des Südens in Syrien, am Euphrat und in Ägypten in unverhüllter Pracht überwältigend auf den Beschauer wirkt, sondern ebensosehr auch ihre selbständig erscheinende Bewegung, ihr täglicher „Tanzreigen" um den Nordpol, sagte dem sinnenden Betrachter mit voller Gewißheit, daß es beseelte Körper, lebendige göttliche Wesen seien, die dort in stiller Erhabenheit ihre Bahnen ziehen. Auch da, wo es keinen eigentlichen Sternkultus gab, wie in Griechenland, wo man die ausgedehnte Verehrung der Himmelskörper selbst als etwas Fremdes, den „Barbaren" Eigentümliches, empfand — das bezeugen der Komiker Aristophanes wie der Philosoph Platon —, war die Beseeltheit und Göttlichkeit der Gestirne eine jener Empfindungen, die einmal eingewurzelt sich dem Gemüt nicht mehr entreißen ließen. Es ist dem Aufklärer Anaxagoras übel bekommen, daß er gewagt hatte, in Sonne und Mond nichts als glühende Steinmassen zu sehen; und nicht nur Platons religiöser Geist, sondern auch die nüchternere Art seines Schülers Aristoteles hielt an den göttlichen Lenkern der Gestirne unverbrüchlich fest, eine Lehre, die er nach einer berühmten Stelle im XII. Buch der Metaphysik (Kap. 8) als die älteste durch alle Zeiten erhaltene theo-

logische Überlieferung und als den Kern des Mythus ansah. Das alte Christentum hat nach manchem Schwanken doch die Verteufelung der Planeten, als seien sie von heidnischen Dämonen oder gefallenen Engeln besessen, abgelehnt: der erste große christliche Philosoph Origenes konnte dem platonischen Glauben an die Gestirne als geistige Wesen von wenigstens fast vollkommener Reinheit, von Verstand und Willensfreiheit nicht entsagen, wenn sie auch folgerichtig wie die Menschenseele der Erlösung bedurften. Dann aber wurden die neun Chöre der Engel zu Lenkern der himmlischen Sphären. So bewegen auch für Thomas von Aquin Engel, substantiae spirituales, die Sterne, und Dante mochte ebensowenig auf lebendige und bewegende Kraft in den himmlischen Sphären verzichten:

> Kraft und Bewegung müssen jene Kreise
> Von seligen Lenkern zugehaucht empfangen,
> Wie Stein sich formt nach seines Künstlers Weise.

Seltsam verbinden sich in Raffaels Deckenmalereien in der Capella Chigi in S. Maria del Popolo die alten griechischen Göttergestalten der Planeten bei der Weltschöpfung mit den Engeln, die sie nach dem göttlichen Willen zu leiten haben. Es fehlt nicht einmal ganz an modernen Denkern, die in dem Glauben an Sternbeseelung den Alten nachgegangen sind; nicht nur der reaktionäre Mystizismus eines Grafen de Maistre stellt solche Postulate, sondern ebenso die Naturbegeisterung eines freien Denkers, wie Giordano Bruno, und wiederum der gemütvolle Sinn eines Naturkenners und Philosophen wie Gustav Theodor Fechner, dem jedes Gestirn, auch die Erde, seine eigene gegen alle anderen Gestirne abgeschlossene Bewußtseinswelt hat, die zwischen dem göttlichen und dem menschlichen Bewußtsein in der Mitte steht.

Die himmlische Heimat.

Je stärker und tiefer aber der Glaube an die Göttlichkeit der Gestirne, an die göttliche Schönheit und Erhabenheit der Welt zu unseren Häupten sich in die Menschenseele senkt, desto zwingender wird in ihr der Wunsch, das Jenseits, in das die Seelen sei es aller Menschen, sei es nur der großen und guten, nach dem Tode wandern werden, nicht mehr in das Dunkel der Erde oder auf ferne selige Inseln, sondern in die reinen Höhen des Himmels zu verlegen. Unendlich weit ist auch diese Vorstellung verbreitet, und von den Stationen der Himmelsreise der Seele haben die Völker in allen Weltteilen verwandte Phantasien geträumt. Dort droben, im reinen Äther, auf Sonne, Mond und Sternen muß die ewige Heimat liegen; von dort ist, wie die tiefsinnige Mystik des Platon und im Kerne ähnlich des großen Mystikers unter den Stoikern, Poseidonios, lehrt, die Seele mit gebrochenem Gefieder in dieses irdische Dasein herabgestoßen, weil sie nicht mehr imstande war, dem Zug des Zeus und der übrigen Götter um den Himmel zu folgen; und dorthin kehrt sie zurück, wenn sie, aus dem Gefängnis des Körpers befreit, wieder der Majestät ihres Ursprungs würdig geworden ist. „Wo das ewige Licht entspringt, wo die Sonne ewig strahlt, in der Unvergänglichkeit, dort, o Soma, laß

mich sein“ singt ein Hymnus des Rig-Veda. Die Milchstraße vor allem ist für viele Völker der Pfad der Seelen und der Götter; auf ihm gelangen nach dem Glauben der Indianer die Seelen in die Wohnplätze der Abgeschiedenen: ihre Wachtfeuer sieht man als helle Sterne leuchten. Und ganz ebenso ist für die pythagoreische Vorstellung, wie sie Ovid im ersten Buch seiner Verwandlungen entwickelt, die Milchstraße der Weg der Himmlischen zu der Burg des Zeus, und für andere der Pfad, den die Seelen emporsteigen, oder selbst ihr dauernder Aufenthalt. Noch spätere christliche Vorstellung hat hier Maria zum Himmel aufsteigen lassen und darum die Milchstraße zur Marienstraße gemacht. Von den übrigen Sternen trat im Glauben der Germanen vielleicht das Sternbild des Nordens, der Himmelswagen, hervor; aus den dürftigen Angaben hat man mit freilich nur sehr geringer Sicherheit erschlossen, daß auf ihm Wodan die Seinen hinauf in lichte Höhen fährt. Gottfried Keller hat in seinem letzten Gedicht nicht lange vor seinem Tode mit ergreifender Gewalt die alten Töne, die ihm vielleicht aus Simrocks deutscher Mythologie nachgingen, wieder erklingen lassen: „Heerwagen, mächtig Sternbild der Germanen, das du fährst mit stetig stillem Zuge über den Himmel vor meinen Augen deine herrliche Bahn, von Osten aufgestiegen alle Nacht! O fahre hin und kehre täglich wieder ... Und bin ich müde, o so nimm die Seele, die so leicht an Wert, doch auch an üblem Willen, nimm sie auf und laß sie mit dir reisen, schuldlos wie ein Kind, das deine Strahlendeichsel nicht beschwert ... Ich spähe weit, wohin wir fahren“.

Die Sphärenharmonie.

Das Wunder ist des Glaubens liebstes Kind; vielleicht wird man also der uns so märchenhaft vorkommenden Idee der Sphärenharmonie auch eine rein religiöse Entstehung zuschreiben wollen. Das ist schwerlich zutreffend: ihrem Ursprung nach gehört diese Lehre in die Geschichte der Wissenschaft. Es ist ein falsches Schlußverfahren, auf dem sie beruht. Pythagoras und seine Schule, die gleichzeitig die Wahrnehmung des Verhältnisses der Saitenlänge zur Tonhöhe und die Erkenntnis der ewigen Ordnung im Weltall mit allem berauschenden Glück einer grundlegenden neuen Wahrheit ergriff, hielten eine Bewegung, vollends die Schwingung der großen Weltkörper ohne einen Ton für undenkbar. Daß er irdischen Ohren unvernehmlich ist, war ihnen kein Gegenbeweis. Der Ursprung der Theorie ist also durchaus wissenschaftlich. Aber daß sie sich Geltung verschaffte und bis in das Mittelalter und in die neue Zeit erhalten blieb, daran hatte religiöses Empfinden einen starken Anteil. Der erhabene Anfang des 19. Psalms „die Himmel erzählen die Ehre Gottes ... durch alle Lande gehet ihr Klang“ schien die biblische Bestätigung für die pythagoreische Lehre zu liefern; und die Schönheit der Vorstellung hat mächtig zu ihrer Erhaltung mitgewirkt. Shakespeares Lorenzo im letzten Akt des „Kaufmann von Venedig“ mag von diesem „Chor der hellgeaugten Cherubim“, dieser „Harmonie der ewigen Geister“, die hier lieblicher irdischer Musik zu präludieren scheint, für moderne Empfindung den eindrucksvollsten Nachklang geben.

Die Gestaltung der Sternbilder.

Der Blick, den die Notwendigkeit der Orientierung auf Meer oder Land oder ein religiöser Trieb zum Himmel emporrichtet, mag in klaren Nächten zunächst mutlos vor der unendlichen verwirrenden Fülle der einzelnen Sterne zurückschrecken. Doch bald fügen sie sich ihm an verschiedenen Stellen deutlich zu ausgeprägten Gruppen zusammen: Figuren wie Pfeil oder Dreieck, Kranz und Himmelswagen, auch ein mächtiges Untier wie der Skorpion und manches andere zeichnen sich auch an unserem nordischen Himmel ohne weiteres rein und deutlich ab. Um so mehr am klareren Nachthimmel des Südens. Bei vielen anderen Sterngruppen, sogar weitaus der Überzahl, läßt die gegenseitige Lage der einzelnen Sterne der Imagination den freiesten Spielraum. Aus dem Sternbilde des Orion, in dem wir mit Griechen und Arabern so deutlich einen riesigen schreitenden Mann (der Kopf ist freilich nur dunkel) zu erkennen glauben, hat die Phantasie eines Naturvolkes wie der öfter genannten Bakairi etwas ganz anderes gestaltet: „Der Orion ist ein großes Gestell, auf dem Mandioka getrocknet wird, die größeren Sterne sind die Pfostenköpfe; und so bezeichnet der Sirius, der ja in nächster Nähe steht, das Ende eines großen Querbalkens, durch den das Gestell von der Seite her gehalten wird. Die Pleiaden, offenbar der Ausgangspunkt der ganzen Auffassung, sind ein Haufen beiseite gefallener Mehlkörner; ein dickerer Klumpen, der „Vater des Haufens", ist der Aldebaran. Es gibt am Himmel Mandioka, Pflanzungen, Wald, alles, alles", sagte Karl von den Steinens Gewährsmann. Noch eindringlicher sieht man, wie viele Möglichkeiten der Deutung eines gegebenen Sternbildes selbst von großer Deutlichkeit innewohnen, wenn man hört, daß unser Skorpion ihnen ein Tragnetz für Kinder ist. Was wir den Kleinen Bären nennen — ein höchst unnatürliches Sternbild, das nur als Parallele zu dem Großen überhaupt verständlich ist —, sahen die Maya in Zentralamerika vielleicht als einen Affen an, der sich mit seinem Greifschwanz am Polarstern festhält; das ist noch besser als die ebenfalls verständliche Bezeichnung als Kynosura, Hundsschwanz, bei den Griechen. Es ist lehrreich, daneben noch die altarabischen Namen für das gleiche Bild zu betrachten. Wie es den Arabern eigen ist, überhaupt weit kleinere Gruppen weniger zu Bildern zusammenzufassen, als vielmehr Stern für Stern zur Unterlage eines reinen Phantasiespieles zu machen, so entdecken sie nicht nur (geradeso wie im Großen Bären) eine Bahre und drei Töchter, sondern in anderer Auffassung auch zwei Kälber und einen Bock in den sieben Sternen des Bildes. Dem ähnlich ist es, wenn volkstümliche deutsche Namen aus den drei Sternen des Oriongürtels drei Mähder oder die heiligen drei Könige machen: auch das wieder ohne jede Rücksicht auf das große, für uns sich so gut zusammenfügende Bild. Die Griechen selber haben aus dem Orion auch einen Hahnenfuß und eine Doppelaxt gemacht. Allzuviel wird man also auf den unmittelbaren Zwang der zur Verfügung stehenden Sterngruppen nicht geben dürfen, auch wenn auf der einen Seite Karl von den Steinen erklärt, man

brauche nicht Indianer zu sein, um die Tiere, die die Bakairi in die Milchstraße setzen, zu bemerken, und andererseits mit der gleichen Lebendigkeit Parthey in seinen Wanderungen durch das Niltal versichert, wie man in Nubien erst den Namen und die Gestalt der einzelnen Sternbilder verstehen lerne, „das mächtig hervortretende Haupt des Stieres mit den drohenden Hörnern, den springenden Löwen, den ruhig gelagerten umschauenden Widder und den aufs natürlichste gewundenen Schwanz des Skorpions". Und doch haben die Beduinen statt eines Stierkopfes unter anderem das große und die kleinen Kamele, dazu die beiden Hunde gesehen. Es geht wie im „Hamlet" mit der Wolke, die wie ein Kamel oder auch wie ein Wiesel aussieht.

Tiere, Heroen und Geräte am Himmel.

Die Verteilung der Sterne am Himmel gibt also zwar vielleicht Anregungen zur Ausgestaltung von Bildern, aber sie wirkt nur in ganz wenigen Fällen zwingend. Und dennoch sind die Dinge, die am Himmel gefunden werden, bei den verschiedensten Völkern zwar im einzelnen fortgesetzt verschieden, im ganzen aber derselben Art: es sind nur selten Pflanzen, häufiger Werkzeuge und Waffen, sodann — nicht überall — Menschen und ganz besonders zahlreich Tiere. Der „Tierkreis", den wir durch die Vermittlung der Griechen von den Babyloniern überkommen haben — es wird darüber später noch etwas genauer zu sprechen sein —, enthält, wie er seit dem Dichter Arat der ganzen griechisch-römischen Kulturwelt, also auch den neueren Kulturvölkern vertraut ist, sieben Tiere nebst einem tiermenschlichen Mischgeschöpfe, dem als Kentaur oder Silen gebildeten Schützen; dazu kommen drei menschlich gestaltete Bilder (Zwillinge, Jungfrau, Wassermann, der vielleicht auch zur Urne erst hinzugekommen ist), endlich ein Gerät, die Wage, dem übrigens später gern ein menschlich gebildeter Träger gegeben wurde. Sucht man den Weg zurück von diesem griechischen Tierkreis zum babylonischen, so ist die Vergleichung dadurch erschwert, daß wir noch nicht in allen Fällen den Namen des entsprechenden babylonischen Bildes kennen; jedenfalls können wir hier neben sechs oder sieben Tieren nur ein vermutlich später, aber nicht von jeher menschlich gestaltetes Bild (die Zwillinge), sodann neben der Wage, die jedoch ursprünglich offenbar mit dem Skorpion als dessen „Scheren" eine Einheit war, noch an Stelle der Jungfrau die Ähre nachweisen, Spica, wie noch heute der hellste Stern des Bildes genannt wird. Es ist sehr wichtig, daß für diese beiden Sternbildnamen, die allein von den sonstigen tierischen oder menschlichen Gestalten abweichen, kalendarischer Ursprung ziemlich sicher ist; der Spätaufgang der Ähre, die babylonisch genauer „Verkündiger (?) des aufsprießenden Getreides" heißt, bezeichnet das Getreidewachstum, die Wage ist das Zeichen der Herbst-Tag- und Nachtgleiche. Beide zeigen also andere Entstehungsarten als die übrigen Tierkreisbilder, in deren Namen wohl niemand mehr die früher mit aller Gewalt und dennoch vergeblich erpreßte kalendarische Bedeutung wird suchen wollen. Dabei kann die Ähre sehr wohl für sich ebenso alt sein

wie die übrigen Bilder, nur schwerlich als Tierkreisbild: es ist eben, wie es sich für den Kalender auch besser eignet, der Name eines einzelnen Sternes gewesen, nicht der eines ganzen Bildes. Die Wage dagegen ist ganz offenbar erst spät geschaffen worden, um die Zwölfzahl der Bilder vollzumachen. Unter den übrigen babylonischen Sternbildnamen, deren Sinn bis jetzt ergründet ist, befinden sich solche von Waffen (zwei Bogensterne, ein Lanzenstern), aber auch ein Löwe und ein „treuer Hirte des Himmels". Am griechischen Fixsternhimmel treten die menschlichen Gestalten neben den tierischen stärker hervor; am nördlichen Himmel steht das ganze Geschlecht des Kepheus — die Tendenz, mehrere benachbarte Sterngruppen in der Benennung oder wenigstens in der Sternsage zu verbinden, ist bei den Griechen genau wie bei primitiven Völkern zu beobachten — neben einer großen Anzahl von Tieren, am südlichen überwiegen durchaus die Tiere; dazu kommen noch einzelne leblose Dinge, wie Leier, Pfeil, Dreieck, Becher, Altar, das Schiff (Argo), die beiden Kränze, endlich der Fluß, wenn man ihn hierher ziehen will. Also nicht mehr als neun oder mit der Wage zehn solche Gegenstände gegen sechsundzwanzig Tiere und zwölf Menschen. Man sieht, wie die letzteren zwei Kategorien am griechischen Sternhimmel durchaus überwiegen.

Die Entstehung der Katasterismen (Versternungen).

Wenn nun der unmittelbare Anblick des Sternenhimmels keineswegs notwendig zu diesen Gestalten führt, wie kommt es, daß sie an den Himmel versetzt werden, wo sie bis heute für uns ihre Geltung behalten haben? Die Griechen selber sagen uns, sie seien von den Göttern „versternt" worden; es sind Gestalten aus der heroischen Zeit und Tiere, die irgendwie mit der Götter- und Heroensage in Verbindung stehen, und die Griechen wissen uns für jedes von ihnen, auch für jedes der leblosen Dinge den Gott zu nennen, der sie an den Himmel versetzt hat. Von einigen wie dem Großen Bären oder vielmehr der Bärin hören wir auch, daß sie erst durch Verwandlung eines Menschen entstanden sind. Der ursprüngliche Vorgang ist hier genau der gleiche wie bei jenem durch Karl von den Steinens klassisches Buch uns so wohl bekannt gewordenen zentralbrasilianischen Volk der Bakairi. Sie sehen die Bilder am Himmel und wissen, daß sie stets dort droben sich befanden; diese Wesen müssen also in alter Zeit von der Erde geschieden sein; sie sehen ferner, daß es doch nicht eigentlich volle Gestalten sind, sondern nur Umrisse von Figuren, und doch müssen sie lebendig sein, da sie sich bewegen und mit Wind und Wetter sich herumschlagen. Es folgt aus alledem für die Indianer, daß dies die verzauberten ältesten Leute und Dinge seien: „der Federball, der Geier, der Jaguar, der Tapir am Himmel beweisen dem Indianer Taten der ältesten Medizinmänner". Die Griechen sind in ihrer Kultur unendlich weit über diese Stufe hinaus; aber der Vorgang bei der Benennung ihrer Sternbilder, in denen sie durch Götter an den Himmel versetzte Heroen und Tiere sehen, zum Teil erst durch Verwandlung aus Menschen entstandene Tiere, gibt die genaue Analogie zu jenem

Gedankengang der Indianer. Der Gott ist, völlig dem sonstigen Verlauf der Religionsgeschichte entsprechend, an die Stelle des Zauberers oder des Dämons getreten. Wie es damit bei den Babyloniern stand, wissen wir noch nicht, wohl kaum sehr verschieden; es ist wenigstens möglich, daß die elf Bilder des Tierkreises (ohne die Wage) irgend einmal die elf tierischen Helfer der Tiāmat darstellten, die nach ihrer Vernichtung an den Himmel gefesselt, also ebenfalls recht eigentlich dorthin verzaubert wurden. Bei den Griechen stehen am Himmel nebeneinander Götterfeinde, wie der Orion oder der Rabe, und Gestalten, die vielmehr zur Auszeichnung an den Himmel gesetzt wurden: es wirken also zwei Motive in der Versternung, die schwerlich gleichzeitig sein können; was erst Verbannung und Fesselung war, wird später vielmehr Verklärung. Daß aber die Tiere unter den Sternbildern der Babylonier und vieler anderer Völker so auffallend überwiegen, erklärt sich wiederum nicht einfach durch die am Himmel gegebenen Gestalten, sondern vielmehr dadurch, daß die dem heutigen Menschen so seltsame und doch in frühen Zeiten der Menschheit so ganz selbstverständliche, mit zwingender Notwendigkeit sich aufdrängende Stufe des Tierkultus oder, allgemeiner gesagt, die Voraussetzung dämonischer Macht in der Tiergestalt eben erst von der Gestirnreligion überwunden wurde, als man Sternbilder zu benennen anfing. Die Griechen sind dann auf dem gleichen Wege weitergegangen, zum Teil unter direktem orientalischen Einfluß, zum Teil aber auch in selbständiger Aufnahme der auch bei ihnen so weit verbreiteten Reste tiergestaltiger Götter. Dann arbeitet das kecke Spiel der dichterischen Phantasie unermüdlich weiter und verknüpft manches Sternbild mit einer ganzen Anzahl von Mythen, die ursprünglich nicht das Geringste mit ihm zu tun haben. Es ist das namentlich bei den alexandrinischen Dichtern ein sehr beliebtes Motiv gewesen. Aber auch schon vor dieser Zeit sind nur die allerwenigsten Katasterismen und Sternsagen aus dem Sternhimmel, d. h. aus der Gestalt, gegenseitigen Stellung und Auf- und Untergängen der Sternbilder entstanden, vielmehr umgekehrt auf sie übertragen worden. Solche Mythen, wie die von dem Tod des Orion durch einen Skorpion, sind unzweifelhaft astronomischen Ursprungs, ein Ausdruck für die Tatsache, daß die Sterne des Orion untergehen, wenn der Skorpion am Himmel erscheint; aber daß die Gestalt des Orion selbst ebenfalls erst aus dem Sternbild herausgesponnen sein müßte, wäre ein voreiliger Schluß, und es ist ein vergebliches Beginnen, die Mythen, die sich an ihn angeschlossen haben, sämtlich aus dem Himmelsbild erklären zu wollen.

Tierdienst und Sternkult in ihrem Zusammenhang.

Sternmythus und Sterndichtung.

Es steht mit dem, was man als Sonnenmythen zu analysieren pflegt, nicht anders. Es ist unmöglich, hier allen den Mythen, die man aus Auf- und Untergang der Sonne oder auch nur aus dem letzteren ableiten wollte, nachzugehen. Nur so viel muß gesagt sein, daß auch dann, wenn ein Mythus, der seinem Ursprung nach wirklich den Tages- oder Jahreslauf der Sonne widerspiegelt, auf einen Gott oder Helden übertragen wird, er

Sonnenmythen

weder für den Gott noch für den ursprünglich göttlichen Helden eine unmittelbare Aufklärung über sein Wesen als Sonnengott geben kann. Nicht jeder Held, den ein Dichter oder ein Mysterienglaube in die Unterwelt hinabsteigen und aus ihr wiederkehren läßt, ist deswegen ein Sonnengott; mag es Gilgamesch gewesen sein, was auch noch nichts weniger als gewiß heißen darf, so ist es darum schwerlich auch schon Odysseus, wenn ihn der Poet den schauerlichen Weg bis an die Schwelle des Hades ziehen läßt, und Orpheus noch weniger, der ganz hinunter steigt und wiederkehrt. Der Mythus lebt sein eigenes Leben weiter, unabhängig von dem Naturvorgang, der ihn vielleicht in irgendeiner Phase angeregt oder befruchtet hat: wie der persönlich gewordene Gott sein Leben weiterführt, unabhängig von dem Stück Natur, mit dem ihn früheste Theologie einst zu verknüpfen suchte. Auch auf Christus ist eine Fülle strahlenden neuen Lichtes gefallen, als ihn die Kirche in Anlehnung an jene Stelle beim Propheten Malachias (IV 2) als die Sonne der Gerechtigkeit dem Sol Invictus der Heiden substituierte; noch ist in unserem Sonntag, der der Tag des Herrn ist, und in unserem Weihnachtsfest ein voller Strahl davon aufgefangen und wirkt, ohne daß sie es wissen, in Millionen befreiend und beglückend weiter. Aber zum Mythus eines Sonnengottes läßt sich darum das Bild der geschichtlichen Persönlichkeit ebensowenig verflüchtigen, wie die christliche Vorstellung irgendeines Jahrhunderts damit erschöpft würde.

II. Die Begründung des astronomischen Weltbildes. Es ist ein gewaltiger Weg von den dunklen Uranfängen bis zu der Zeit, wo der Mensch, d. h. zunächst vorgeschrittene Stämme und Völker, den ersten Kalender aufgebaut und am Himmel sich zurechtfinden gelernt haben. Das eigentlichste Wesen jener dunklen Dämonen, von denen der Naturmensch sich abhängig fühlt, ist gerade ihre Unbestimmtheit, ihre böswillige Willkür und Launenhaftigkeit, von der in jedem Augenblick auch der, dem sie gerade ihre Gunst erwiesen haben, alles zu fürchten hat; so ist auch der Mensch der primitiven Zeit unstet und ruhelos, wie in seinem Jägerdasein so auch in dem, was ihm etwa von Gedanken über die ihn umgebende Welt aufdämmern mag. In willkürlichen Schlüssen und zufälligen Erlebnissen schafft er seinen Fetisch, dem er blind vertraut, bis er seine Wertlosigkeit erkannt hat und ihn mit einem neuen vertauscht. Nun aber hat der Mensch seine feste Stätte gefunden; er ist nicht nur, als Ackerbauer, an die Scholle gebunden und mit ihr physisch und religiös verwachsen, sondern er hat auch seinen festen Platz in Raum und Zeit. Er hat gelernt, sich am Himmel zu orientieren; und der kurze Lauf des Mondes, der Auf- und Untergang der Fixsterne und schließlich der genauer erkannte Jahreslauf der Sonne geben ihm und seinem Tun auch jene zeitliche Bestimmtheit, die geschichtliche Erinnerung erst ermöglicht. Noch ist er vor allem des praktischen Nutzens froh, den ihm seine Erkenntnis schafft; aber untrennbar davon wird sich das Gefühl der Bewunderung und Verehrung

für die Gesetzmäßigkeit steigern, mit der „die Sonne in einem Tag Himmel und Erde umeilt und die Morgenröten nie den alten Pfad verfehlen". Ungezählte Generationen nach ihm werden seine Enkel an der regelmäßigen Wiederkehr der himmlischen Bewegungen den Begriff des Naturgesetzes entdecken. Sie werden aber zugleich auch die Gebundenheit des Menschen an eine bestimmte Stelle im kosmischen Raum und in der Weltzeit zur vollen Konsequenz führen. So geht der Weg, den die Menschheit betritt, mit der gleichen Notwendigkeit zu beidem: zur Astronomie und zur Astrologie. Zur Astronomie, deren ehrfürchtig gepriesene Erhabenheit für den antiken Forscher eben darin liegt, daß sie in der Untersuchung einer ewig sich gleichbleibenden Welt aufgeht; und gleich unabweisbar zur Astrologie, von der die Kulturwelt, auch die griechisch-römische nach Alexanders des Großen Tagen, bis an die Schwelle der Aufklärung beherrscht worden ist. Wie beide sich bis zum Anbruch der neuen Zeit entwickelt haben, wollen in Kürze die Ausführungen der zwei folgenden Kapitel zeigen.

Wohl haben fast alle Kulturvölker sich ein Himmelsbild wenigstens in seinen Anfängen zu eigen gemacht; Ägypter und Chinesen und Araber haben den ganzen Himmel oder wenigstens die am stärksten hervortretenden Sterne in große oder kleine Gruppen zusammengefaßt; die Inder freilich kennen außer ihren 27 oder 28 Mondstationen, die sie wohl auch schwerlich selbst gefunden haben, nur ganz wenige Sterne. Indes alle diese Anfänge haben auf die Entwicklung der modernen europäischen Astronomie keinen Einfluß geübt: sie beschränken ihre Wirksamkeit immer nur auf bestimmte Grenzen, mögen diese an sich auch noch so weit sein. Die Geschichte der astronomischen Erkenntnis der Europäer läßt sich einem einzigen kontinuierlichen Strom vergleichen, der in Babylon seine zunächst noch unansehnliche und an Erdenresten reiche Quelle hat und vor allem in Griechenland durch die verschiedenartigsten Zuflüsse zu gewaltiger Breite und Tiefe angewachsen ist; im lateinischen wie im byzantinischen Mittelalter scheint er zeitweise unterirdisch zu rauschen oder ganz zu verschwinden, bis er mit neuer Kraft in der Renaissance wieder hervorbricht und wiederum, wie schon einmal eine längere Strecke bei den Griechen, die schwere Masse, die er vom Ursprung her und von mancherlei späterer Trübung mit sich führt, abzulagern vermag, daß er nun erst klar und unverzerrt das Bild des Himmels und der Erde spiegle. Auch in allen jenen anderen Ländern der alten Welt, in Ägypten und Indien, bei Chinesen und Arabern, ist irgendwann einmal der belebende Einfluß dieses großen Stromes zu spüren, von dem nicht etwa nur nahe der Quelle, sondern gerade in seinem späteren Lauf starke Kanäle da und dorthin abgeleitet werden; aber davon kann hier nur ganz beiläufig die Rede sein.

Die Astronomie der Babylonier.

Im Zweistromlande sind die Bedingungen für die Ausbildung der Astronomie besonders günstig gewesen: ein außerordentlich klarer Himmel, der die Beobachtung leicht machte, ist schon von den Alten als einer

Babylonische Sternbilder.

der Gründe der frühen Entwicklung der „chaldäischen“ Kunst hervorgehoben worden. Wann diese Entwicklung beginnt, können wir heute noch nicht sicher sagen. Wir wissen nicht einmal genauer, wann die Babylonier die Sternbilder des Tierkreises benannt, wann sie die fünf mit freiem Auge sichtbaren Planeten neben Sonne und Mond gestellt haben. Sicher ist jedoch, daß die Mehrzahl der Sternbilder des Tierkreises von ihnen gestaltet worden ist; es ist wenigstens nicht ganz undenkbar, daß schon das Gilgameschepos, dessen älteste Stücke bis etwa 2000 v. Chr. zurückgehen, ein Zeugnis für die Existenz dieses Tierkreises liefert. Wir können mit Sicherheit sagen, daß es bei ihnen einen himmlischen Stier, Zwillinge, einen Löwen, den Skorpion, einen bogenschießenden Kentaur oder Skorpionmenschen im Schützen, einen Ziegenfisch, endlich einen Fisch (statt der uns geläufigen zwei) gegeben hat; dann die schon besprochenen Bilder des „Verkündigers (?) des Getreidewachstums“ (Ähre in der Jungfrau) und der Wage. Die griechische Überlieferung zeigt, daß diese letztere keineswegs seit alter Zeit vorhanden und ihre Sterne früher als Scheren des Skorpions aufgefaßt wurden; und vielleicht waren einst Wage, Skorpion und Schütze und wohl auch noch der Schlangenhalter (Ophiuchos) zu dem gigantischen Bild eines Skorpionmenschen zusammengefaßt, der den Eingang der Hadeshälfte des Himmels bewachte: auch der Ophiuchos allein ist ursprünglich wohl als Todesgott oder Todesgöttin zu verstehen. Die Sternbilder des Tierkreises wurden als solche offenbar gestaltet, ehe man an die Markierung einer zwölfteiligen Ekliptik mit einigermaßen entsprechenden Sternbildern dachte; und es wird ferner durch manche Umstände wahrscheinlich, daß vor der Ekliptik der Himmelsäquator beobachtet wurde. Charakteristisch babylonisch sind vor allem die Mischgebilde, die heute noch in unseren Kalendern zu sehen sind, wie der in Wahrheit als Ziegenfisch gezeichnete „Steinbock“; und wenn der Schütze noch heute bald in menschlicher Gestalt, doch manchmal mit Pferdebeinen, bald vierfüßig als Kentaur gezeichnet wird, so ist diese Variante allem Anschein nach schon altbabylonisch. — Weniger wissen wir von den übrigen Sternbildern, und ein Vergleich der uns bisher bekannten Namen zeigt, daß die Griechen nur einen Teil der uns noch heute geläufigen Namen von ihnen entlehnt haben können. Wohl aber haben die Babylonier zuerst die fünf Planeten, die mit Sonne und Mond später meist zur Siebenzahl verbunden werden, beobachtet und mit bestimmten Göttern in Verbindung gebracht; auch das haben die Griechen übernommen und nach mancherlei Schwanken, bei dem z. B. der Morgen- und Abendstern nicht bloß als Planet der Venus, sondern ebenso als Stern der Isis oder der Hera, früher auch als Phaëthon, der Morgenröte Sohn gedacht wurde, jene Namen festgestellt, die wir in den lateinischen Formen Merkur, Venus, Mars, Jupiter, Saturn noch heute gebrauchen.

Ostasiatischer Tierzyklus und Dodekaoros.

Ungewiß ist es noch, ob der ostasiatische Zyklus von zwölf Tieren, der von Turkestan bis Japan als Bezeichnung von Jahren, Monaten und Stunden

verbreitet ist, aber auch auf griechisch-ägyptischen Denkmälern der Römerzeit und in gleichzeitigen griechischen Schriftstellern als die Dodekaoros, d. h. Kreis der zwölf Stunden, begegnet, ebenfalls babylonischen Ursprungs ist. Wenn diese Frage einmal mit Sicherheit sich bejahen lassen wird, so wird zugleich auch der Ursprung der 28 Mondstationen, also der Sternbilder, bei denen der Mond je einen Tag verweilt, aufgeklärt werden; denn manche bisher noch nicht ausgenützten Zeugnisse weisen darauf hin, daß es ursprünglich ebendiese Mondstationen waren, aus denen der Kreis der zwölf Tiere hervorgeht. So wird wohl auch hier Mondbeobachtung und Mondkalender vorangehen; und das stimmt mit der Wahrscheinlichkeit alten Mondkultus in Babylon überein. Allerdings scheint aber die ostasiatische Gestalt dieses Zyklus nicht unmittelbar aus Babylon zu stammen, sondern hellenistisch vermittelt zu sein.

Alter der babylonischen Astronomie.

Es ist vor nicht allzu langer Zeit in Deutschland vermutet worden, daß der babylonischen Astronomie eine frühe außerordentliche Blüte zuzuschreiben sei, und man hat daraus eine Fülle weittragender Konsequenzen auch für die Entwicklung der Religion und der Mythologie und einer tief in die Geschichtschreibung eingreifenden allgemein „altorientalischen Weltanschauung“ gezogen. Die sorgsame Prüfung der Originaldokumente von astronomischer und assyriologischer Seite hat gezeigt, daß diesen Annahmen der tatsächliche Untergrund fehlt. Die Chaldäer selbst haben allerdings in der Schätzung der Dauer ihrer Himmelsbeobachtungen offenbar nicht ungern zu wirksamen Zahlen gegriffen und mehr als einem Griechen selbst von zweimal 720 000 Jahren ihrer Sternkunde erzählt; aber die älteste babylonische Beobachtung, die ein griechischer Astronom anzuführen weiß, ist die einer Mondfinsternis im Jahre 721 v. Chr. Wir haben aus der Bibliothek Assurbanipals (688—626 v. Chr.) eine große Anzahl von Berichten verschiedener Hofastrologen an den König über ihre Himmelsbeobachtungen neben zahlreichen, jenen Berichten zum großen Teil zugrunde liegenden astrologischen Voraussagungen, die aus älterer Zeit stammen und etwa bis 2000 v. Chr. zurückgehen mögen, wenn sich das auch im einzelnen Fall noch nicht feststellen läßt. In diesen für den König bestimmten, also unzweifelhaft dem höchsten Stand der damaligen Wissenschaft entsprechenden Tafeln zeigt sich nicht nur ein völliges Fehlen einer wissenschaftlichen Terminologie und fester Zahlen- und Maßangaben, sondern auch eines geregelten Kalenders (die Babylonier kennen bis tief ins 6. Jahrhundert v. Chr. weder den achtjährigen noch den neunzehnjährigen Zyklus, also überhaupt keinen Schaltzyklus); ja ihr Himmelsbild ist noch so primitiv, daß sie, wie schon bemerkt, atmosphärische Verfinsterungen der Sonne von ihrer Bedeckung durch den Mond noch nicht unterschieden und in der Wirkung gleichsetzten. So haben die gründlichsten Forscher aus diesen Tafeln nur einen recht unwissenschaftlichen Charakter der älteren babylonischen Himmelskunde feststellen können; auch für sie war, wie sich F. X. Kugler ausdrückt, Stern- und Wolkenhimmel noch

nicht weit auseinander und beides nicht hoch über der Erde. Nur nach einer Seite wird dieses Bild modifiziert durch eine neuerdings gefundene Inschrift, die etwa zwischen 2000 und 1700 v. Chr. anzusetzen ist und einen lehrreichen Versuch zeigt, die Distanz zweier Fixsterne zu messen; wie genau das gelungen ist, steht allerdings noch in Frage.

Die entwickelte Astronomie der spätbabylonischen Zeit.

Eine ganz andere Entwicklung setzt ein in der spätbabylonischen Zeit. Die älteste dieser Inschriften gehört in das Jahr 523 v. Chr.; die späteste in das Jahr 11 v. Chr. Es zeigt sich schon in den Tafeln des 4., noch weit mehr aber denen des 3. und der folgenden Jahrhunderte ein ganz gewaltiger Fortschritt; auf dem Höhepunkt der Entwicklung um Christi Geburt hatten sie eine Reihe der wichtigsten Beobachtungsergebnisse erzielt. Die Ekliptik, die sie „Bahn der Sonne" oder „Ort der Sonne" nennen, hatten sie in zwölf Tierkreiszeichen, die sich an die alten Tierkreisbilder anlehnen, und in 360 Grade eingeteilt. Sie kannten nach Bezolds Zusammenfassung „zwei Systeme zur Berechnung des Mondlaufs, die Dauer des mittleren synodischen und des mittleren anomalistischen Monats; den anomalistischen Lauf der Sonne, ihre größte und kleinste Geschwindigkeit und das siderische Jahr; sie hatten die Mondfinsternisperiode von 18 Jahren 11 Tagen (den Saros) gefunden, auch eine freilich unrichtige größere Periode von 684 Jahren zu gleichem Zweck erdacht; sie vermochten zum Teil den anomalistischen Lauf der Planeten zu bestimmen, fanden das Verhältnis vom synodischen Jupiterumlauf zum siderischen Jahr (427 : 391); sie erhielten sogar in ihren Berechnungen astronomische Konstanten, die nach Kugler zur Bestimmung der Neumondlängen brauchbarer sind als unsere eigene Syzygienberechnung." Gegenüber diesen gewaltigen Fortschritten stehen freilich auch auffällige Mängel; vor allem die Unkenntnis der Präzession — ist doch das Frühlingsäquinoktium in den vorgeschrittensten Syzygientafeln noch im 3. und 2. Jahrhundert v. Chr. zuerst um drei, dann um fünf und vier Tage zu spät angesetzt — und der auch von Diodor hervorgehobene Mangel einer Vorausberechnung der Sonnenfinsternisse. Auch die richtige Planetenordnung nach den Umlaufszeiten haben sie aller Wahrscheinlichkeit nach selbst damals nicht aufgestellt.

Nach allem ergibt sich, daß die babylonische Himmelsbeobachtung erst in den letzten fünf bis sechs Jahrhunderten v. Chr. wissenschaftlichen Charakter angenommen hat, während sie vorher zwar fleißig, aber nicht aus theoretischen Gesichtspunkten, sondern nur zu praktischen Zwecken und mit naiver Vermengung der verschiedensten Himmelserscheinungen beobachteten. Worin der Grund für diesen Aufschwung liegt, vermögen wir noch nicht zu erkennen. Persischer Einfluß ist nicht ausgeschlossen. An griechischen dagegen könnte schwerlich vor Alexander dem Großen gedacht werden, wo seit der Errichtung des mazedonischen Königreichs auf dem Boden Babylons der Verkehr griechischer und orientalischer Wissenschaft ermöglicht war. Ein solcher Verkehr ist auch tatsächlich erwiesen. Der alexandrinische Astronom Ptolemaios hat durch Vermittlung des Hipparch ein-

zelne Finsternisbeobachtungen babylonischer Vorgänger benützt; und neben den längst bekannten Namen des Belpriesters Berossos, der auf der Insel Kos zur Zeit Alexanders babylonische Astrologie lehrte, tritt neuestens ein den Griechen als Kidenas bekannter, auf Keilschrifttafeln Kidinnu genannter babylonischer Gelehrter, dem Hipparch die bisher ihm zugeschriebene Finsternisperiode von 251 synodischen und 269 anomalistischen Monaten entlehnt hat. Anderseits sehen wir den Stoiker Archedemos in dem gleichen Jahrhundert in Babylon eine griechische Philosophenschule eröffnen und hören von Seleukos aus Seleukeia am Tigris als einem der wenigen Verkündiger von Aristarchs heliozentrischem System. So werden sich wohl mehr und mehr für die spätere Zeit Wechselwirkungen herausstellen; aber den Aufschwung der babylonischen Wissenschaft vom 6. Jahrhundert ab können wir nicht den Griechen zugute schreiben. Vielmehr wird sich das Verhältnis wohl so herausstellen, daß die Babylonier als sorgsame Beobachter und Rechner vielfach von hoher Bedeutung sind, während sie die systematische Verwertung ihrer Ergebnisse und die Ausbildung eines philosophisch begründeten rationellen Weltbildes an Stelle ihrer primitiven Vorstellungen dem freien Geiste der Griechen überlassen mußten.

Die Astronomie der Griechen.

Von einer der großen Entdeckungen des griechischen Weltbildes, von der Kugelgestalt der Erde, hat ein moderner Astronom, Giov. Schiaparelli, gesagt, daß sie sicherlich nicht geringer anzuschlagen sei als die der Gravitation. Es ist hier wie auf allen Gebieten der Philosophie und auf vielen der Wissenschaft: der rastlose Erkenntnisdrang des griechischen Geistes hat auch in der Gestaltung des Weltbildes die religiös befangenen Vorstufen so weit hinter sich gelassen, daß die Entwicklung der neueren Zeit überall unmittelbar an diese seit vielen Jahrhunderten fast vergessenen Ahnungen und Erkenntnisse anknüpfen und sie zum Teil ohne weiteres aufnehmen konnte. Und doch ist alles Entscheidende auf dem Wege von Thales bis Hipparch gefunden: es sind nicht viel mehr als vier Jahrhunderte gewesen, in denen die griechische Forschung, nach allen Seiten vordringend, die Grenzen des gebundenen Weltbildes der Vorzeit ins Ungemessene erweiterte.

Die volle Freiheit des griechischen Geistes tritt uns im Grunde schon in den homerischen Gedichten entgegen mit ihren menschlichen, auch allzumenschlichen Göttern und halb göttlichen Helden; und ein Gedicht von der kühnen Unbefangenheit und Weltlichkeit, wie das des großen Lyrikers Archilochos auf eine Sonnenfinsternis (wohl die von 648), wäre im ganzen Orient undenkbar. Wissenschaftliche Züge wird im homerischen Weltbild niemand suchen wollen; und ebensowenig in der praktischen Bauernweisheit des Hesiod mit ihren bescheidenen Kalenderangaben und ihrem kräftigen abergläubischen Einschlag. Die griechische Wissenschaft aber beginnt an der gleichen ionischen Küste, wo die heitere Unbefangenheit und Üppigkeit des Heldengesanges zur vollen Blüte emporwuchs: nicht im griechischen Mutterlande, sondern in Ionien, wo der kühne Geist er-

obernder Kolonisten mit der heimischen Scholle und den Gräbern der Ahnen so manche altersgraue Ehrfurcht und so manchen dumpfen Wahn hinter sich gelassen hatte, und wo zugleich die alte Kulturwelt des Ostens unmittelbar einwirken konnte. Es ist hier nicht möglich, diese Entwicklung von Etappe zu Etappe genauer zu verfolgen; nur die Hauptstationen des Weges mögen bezeichnet und die Ergebnisse kurz erwähnt werden, die unmittelbar für die Umgestaltung des Weltbildes von Bedeutung sind. Wenn am Anfang offenbar noch der Einfluß des Orients in Thales von Milet dominiert, so wächst die Entwicklung der ionischen Naturphilosophie seit Anaximander bald darüber hinaus, ohne deswegen den Zusammenhang mit dem Osten einfach abzubrechen, wie man früher zumeist geglaubt hat. Der zweite mächtige Fortschritt knüpft sich dann an die zunächst auf italischem Boden begründete Schule der Pythagoreer; so oft es uns hier an genügender Sicherheit der Überlieferung gebricht, so sehen wir doch, wie weit ihr Tiefsinn und ihre Kühnheit der Folgezeit vorauseilt. Dann sammelt sich alles, was die Früheren gefunden, im Garten der Akademie, in der Schule des Platon, zu dessen Freunden auch der Astronom Eudoxos zählt; dann im Peripatos des Aristoteles. Die Organisation der athenischen Philosophenschulen wird später in den hellenistischen Reichen, vor allem in Alexandria übernommen. Aber die entscheidenden Großtaten in dieser Entwicklung sind, trotz der Blüte der Mathematik und Astronomie in Alexandria, den Griechen der kleinasiatischen Küste vorbehalten: in Aristarch von Samos im 3. Jahrhundert v. Chr. vereinigt sich der Einfluß der peripatetischen Lehre mit einem starken Einschlag des Atomismus, um die kühnste Weltkonstruktion, die das Altertum gefunden hat, zu erzeugen. Zumeist auf Rhodos ist ein gutes Jahrhundert später Hipparch von Nikaia tätig, der „Gewissenhafteste", wie ihn sein Nachfolger Ptolemaios nennt; auf Rhodos wirkt auch der große Stoiker Poseidonius im 1. Jahrhundert v. Chr. Das Erbe der alten Zeiten tritt im 2. nachchristlichen Jahrhundert Klaudios Ptolemaios in Alexandria an; als der Hauptvertreter des astronomischen Weltbildes, der er durch sein umfassendes Handbuch der Astronomie, das die Araber Almagest hießen, und durch seine Geographie im Mittelalter und bis tief in die Neuzeit geblieben ist, steht er, mit dem Globus in der Hand und (als vermeintlicher König von Ägypten) mit der Krone auf dem Haupte, auf Raffaels Schule von Athen dem Zoroaster mit dem Himmelsglobus gegenüber. Die Schulen von Alexandria und Athen haben noch jahrhundertelang ein Stück der großen Tradition bewahrt, was selbst noch ein Lehrbuch wie die Hypotyposen (kurze Darstellung der astronomischen Hypothesen) des Lykiers Proklos († 485) trotz aller seiner Schwächen zeigen kann. So brauchte die Fortsetzung der griechischen Astronomie durch die Araber hier nicht auf eine weit entlegene Zeit zurückzugreifen.

Die Entdeckung der Kugelgestalt des Himmels und der Erde.

Das Attribut, das Raffael in seinem Bilde den beiden Vertretern der Himmels- und Erdkunde gibt, der Globus, ist in der Tat wie kein anderes

geeignet, den wichtigsten Fortschritt der Erkenntnis auf diesem Gebiete symbolisch zu vergegenwärtigen. Noch für Thales schwamm die Erde als eine flache Scheibe auf dem Wasser. Aber schon sein nächster Nachfolger Anaximander hat die fundamentale Erkenntnis gefunden, die die sichtbare Halbkugel des Himmels zur vollen Kugel vervollständigte und damit erst die Bewegung des Fixsternhimmels verständlich machte. Wäre diese Auffassung schon vor Anaximander, was mancher auch ohne Beweis zunächst wohl annehmen möchte, den Babyloniern bekannt gewesen, so wäre es kaum verständlich, daß Anaximanders Nachfolger Anaximenes wieder zu jener primitiven, auch von den Ägyptern geteilten Konstruktion zurückkehrte, die allabendlich die Sonne und tagsüber die übrigen an dem Himmel befestigten Gestirne, gedeckt durch die hohen Berge des Nordens, sich nach Osten zurückbewegen ließ. Auch ist die babylonische Annahme von Himmelstoren, durch die die Sonne jeden Tag eintritt, ein Beweis gegen die Annahme der Kugelgestalt des Himmels, und die Existenz des Tierkreises, selbst die Erkenntnis der Ekliptik, noch kein Beweis dafür, da sich dieser Kreis ja nur wenig unter dem Horizont zu bewegen brauchte. Der Kugelgestalt des Himmels ist die der Erde erst in einigem Abstand gefolgt, und wir wissen nicht einmal sicher, auf wen wir sie zurückführen dürfen. Zwar ist Parmenides unser ältester Zeuge dafür, aber diesem durchaus abstrakten großen Denker möchte man die erste Erkenntnis hier weniger leicht zutrauen als seinen Lehrern, den Pythagoreern. Anaximander hat sie noch nicht besessen; aber er hat doch schon die alte Vorstellung von der Erdscheibe aufgegeben und sie sich zylindrisch, wie ein Tamburin, vorgestellt. Und einer seiner geistvollsten Gedanken, der in gewissem Sinne die Attraktionslehre vorwegnimmt, mußte schließlich in solche Richtung führen. Er hat zu allererst die Kühnheit gehabt, die alte Vorstellung von der festgewurzelten Erde völlig zu verlassen und sie frei im Raume schweben zu lassen. Er hat das begründet mit dem Hinweis, daß die Erde von der Himmelskugel auf allen Seiten gleichweit entfernt sei und daher keinen Antrieb nach irgendeiner Seite erleiden könne, also frei am gleichen Orte schweben müsse. Es ist klar, daß dieses Argument bedeutend verstärkt wurde, wenn auch die Erde sich als Kugel denken ließ. So war die Form für Himmel und Erde gefunden, die ebensosehr vorwärtstreibend wie hemmend auf den Fortschritt der griechischen Astronomie einwirken sollte.

Die griechischen Vorstellungen vom Fixsternhimmel.

Schon die Vorstellung Anaximanders muß den Himmel sehr viel größer gedacht haben, als das bisher der Brauch war. Wie bescheiden die Überlieferung gewesen sein muß, auf der er weiter arbeitete, lehrt die Tatsache, daß er die Fixsterne noch unterhalb von Sonne und Mond gestellt hat; die gleiche, bei der häufigen Bedeckung von Sternen durch den Mond höchst befremdende Annahme wird von mehreren Völkern, auch von Babyloniern und Persern ausdrücklich berichtet. Das hat sich wohl schon unter seinem nächsten Nachfolger und vollends durch die pythagoreische Himmelskunde

verbessert. Aber nicht einmal die Annahme, daß die Fixsterne alle auf derselben Kugeloberfläche liegen, ist bei den Griechen so ausschließlich herrschend geblieben, wie man meist annimmt; sie haben, wie wir aus Zeugnissen des letzten Jahrhunderts v. Chr. wissen, die Möglichkeit erwogen, daß einzelne Sterne weniger hoch, andere höher liegen, und daß sie zum Teil darum ungleich lichtstark erscheinen. Gleichwohl war es nur selbstverständlich, daß man es für alle Berechnung und Darstellung bei der einen Kugeloberfläche für den Fixsternhimmel beließ. Die Kugelgestalt der einzelnen Fixsterne ist wieder durch die Sternkunde der Pythagoreer durchgedrungen und später allgemein anerkannt gewesen; und jedes Gestirn wurde ihnen zu einem Kosmos, der Erde, Luft und Äther umfaßte und darum zur Aufnahme unsterblicher Seelen geeignet schien. Setzt schon diese Meinung einen annähernd richtigen Begriff von der Größe der Sterne voraus, so ist dem Anaxagoras die Sonne schon so groß wie der Peloponnes, dem Aristoteles aber das Volumen der Erde bereits viel kleiner als das mancher Fixsterne. Spätere, wohl besonders Poseidonios, lehrten, daß sie alle größer als die Erde und viele gleich groß oder größer als die Sonne selbst seien. Eine Bewegung der Fixsterne um ihre eigene Achse haben die Pythagoreer wie Platon und später Ptolemaios einleuchtend gefunden. Selbst die Frage, ob die Fixsterne ihren Ort verändern, ist von Hipparch unter dem Eindruck des Aufleuchtens eines neuen Sterns (wohl im Skorpion) ernstlich erwogen worden, schien aber durch seine Messungen ausgeschlossen. Das gleiche Ereignis aber veranlaßte ihn auch zu seinem Unternehmen eines großen Fixsternkataloges mit Angabe der Positionen und der scheinbaren Größe; er hatte darin nur dürftige Vorarbeiten, aber die Angaben des Timocharis, der nur etwas mehr als anderthalb Jahrhunderte vor ihm beobachtete, gaben ihm die Erkenntnis der Präzession der Fixsterne oder, wie man sich zumeist ausdrückt, des Frühlingspunktes. Mit der ihm eigenen echt wissenschaftlichen Vorsicht nahm er, da eine genaue Bestimmung noch nicht möglich schien, als ein Minimum den Wert der Präzession zu einem Grad für 100 Jahre an; die sehr viel weniger exakte Beobachtungsweise des Ptolemaios hat erst diesem Näherungswert unbedingte Geltung bis auf die Araber Al-Battānī und Ibn Jūnus verliehen. Es ist sehr auffallend, daß die Babylonier bei ihren Beobachtungen und namentlich bei der Exaktheit ihrer Himmelstafeln in später Zeit diese Tatsache nicht bemerkt haben. Es muß also an einer über Jahrhunderte hinausreichenden brauchbaren Überlieferung und vor allem auch an dem theoretischen Interesse, an dem Trieb, Gesetze zu erkennen und zu formulieren, gefehlt haben, der den Griechen eigen war; auch die Rechnung der älteren Babylonier mit dem Sideraljahr ist dabei ohne Zweifel von Einfluß gewesen. Sie konnten sehr wohl die Wirkung der Präzession wahrnehmen, ohne dem Phänomen irgendein Gesetz zugrunde zu legen; aber wenn sie, wie früher angedeutet, ihre Tierkreisbilder in verschiedenen Zeiten sehr verschieden ergänzten — man darf

sich z. B. vorstellen, daß die Sterne des Widders einst die seltsame Halbfigur des Stieres vervollständigt haben — so war selbst die bloße Wahrnehmung und Konstatierung einer Veränderung des Frühlingspunktes außerordentlich erschwert. Wäre wirklich, wie neuerdings trotz der offenbaren Gegenbeweise oft behauptet worden ist, die Präzession den Babyloniern schon seit Jahrhunderten oder gar Jahrtausenden bekannt gewesen, so wäre es ganz unverständlich, daß griechische Astrologen anscheinend zwischen Hipparch und Ptolemaios — und zwar sicherlich in der Absicht, die Fiktion uralter Himmelsbeobachtungen der Völker des Ostens zu wahren — die fortdauernde Präzession durch eine Oszillation zu ersetzen suchten, durch ein Schwanken des Frühlingspunktes um vier Grade nach Westen und vier Grade nach Osten, in Perioden von 640 Jahren, und daß man in Theons und Proklos' Zeit sich nicht zum Gegenbeweis auf jene angeblich uralte Feststellung der Präzession berief. Nicht länger also wußte man das Phänomen der Präzession beobachtet, als eben seit Hipparch, der seinerseits sicherlich glücklich gewesen wäre, seine Beobachtungen nicht bloß mit denen eines 170 Jahre früher lebenden Astronomen vergleichen zu können: zeigt doch jeder Blick in die Quellen, wie wenig er jene neubabylonischen Beobachtungen verschmäht!

Sonne und Mond in der griechischen Astronomie.

Die Erhellung des Mondes durch die Sonne war jedenfalls schon zur Zeit des Parmenides um 500, vielleicht vor ihm von Pythagoreern erkannt: darin mögen ihnen wohl die Babylonier vorausgegangen sein, obgleich gerade Berossos eine seltsame und unzulängliche Erklärung der Mondphasen mitteilte. Anaxagoras hat die richtige Erklärung der Mondphasen und der Sonnen- und Mondfinsternisse dann in Athen verbreitet; aber aus Empedokles wird man folgern dürfen, daß vor ihm auch die Pythagoreer die Sonnenfinsternis schon verstanden haben. Die Befreiung von all dem Wahnglauben, der sich an das natürliche Ereignis der Verfinsterung von Sonne und Mond anschloß, ist von den Griechen immer als ein Ruhmestitel des menschlichen Erkennens gefeiert worden; die einfache Manier, mit der Perikles einen furchtsamen Soldaten durch Vorhalten seines Mantels über die Ursache der Sonnenfinsternis zur Raison gebracht haben soll, hat freilich nicht in allen Schichten weitergewirkt. Einen großen Katalog der Finsternisse hat Hipparch angelegt. Er hat die von ihm als ungenügend befundene Finsternisperiode des dreifachen Saros oder Exeligmos (von 54 Jahren 33 Tagen) nach babylonischem Vorgang, dem jenes hellenisierten Chaldäers Kidenas (babylonisch Kidinnu), durch eine Periode von 251 synodischen und 269 anomalistischen Monaten und eine daraus abgeleitete größere von 4267 synodischen und 4573 anomalistischen Monaten ersetzt. — Die Entfernung des Mondes und der Sonne von der Erde ist von den Griechen in zunehmendem Maße richtig berechnet worden. Aristarch von Samos war hier bahnbrechend und ist auf lange Zeit bestimmend geblieben; seine sinnreiche Methode, durch Winkelmessung bei der Dichotomie des Mondes die Relation der Distanz Mond

bis Erde und Sonne bis Erde zu finden, war an sich durchaus zweckmäßig und lieferte nur wegen der Schwierigkeit der Beobachtung die viel zu kleine Zahl 19 statt 384. Der äußere Höhepunkt dieser mit so beschränkten Mitteln unternommenen Versuche ist die Annahme des Poseidonios von 50000 geographischen Meilen für den mittleren Abstand des Mondes von der Erde, was der Wirklichkeit (51 800 Meilen) fast genau entspricht; seine Schätzung der Sonnenentfernung ergab etwa $^5/_8$, die des Sonnendurchmessers $^3/_8$ der wirklichen Beträge. Auch die Erdmessung des Eratosthenes war methodisch durchaus richtig, freilich mit starken Fehlern in der Ausführung behaftet, weil er voraussetzte, daß Alexandria und Syene auf dem gleichen Meridian lägen, und außerdem die königlichen Vermessungsbeamten eine ungenaue Entfernung von Syene nach Alexandria lieferten; daher übertrifft sein Ergebnis von 250000 Stadien = 46250 oder vielleicht nur 44350 km für den ganzen Erdmeridian, das übrigens doch nur einen Näherungswert liefern sollte, den wahren Wert von 40000 km nicht unbeträchtlich. Es kann weniger dem ersten Versuch als der Trägheit der Nachfolger zur Unehre gereichen, wenn der Fehler nicht verbessert, sondern sogar noch stark vermehrt wurde. Es ist fast symbolisch, daß Ptolemaios nicht nur den Umfang der Erde gleich Poseidonios zu klein machte, sondern geradeso in der Annahme der Entfernung der Sonne wieder auf Hipparch zurückging, ohne hier Poseidonios' Hypothesen zu beachten. Das Weltall beginnt für Ptolemaios, der auch darin an der Schwelle des Mittelalters steht, wieder kleiner zu werden.

Planetenkenntnis der Griechen.

Die Kenntnis der Planeten haben die Griechen unzweifelhaft von den Babyloniern erhalten. Griechischen Ursprungs scheint jedoch, soviel sich bis jetzt aus den babylonischen Inschriften ergeben hat, die rechte Anordnung nach der Umlaufszeit (Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn). Merkwürdig ist, wie die Griechen auch hier wieder den unbefangenen Blick bewahrten. Sowenig sie ohne die Hilfe des Fernrohrs weitere Planeten nachzuweisen vermochten, so wurde vielleicht schon von Demokrit, sicher aber von späteren Gelehrten die einfache Annahme der Fünf- oder Siebenzahl abgelehnt, trotz ihrer fundamentalen Bedeutung für die Astrologie: die Forschung ergebe nicht, daß nur fünf in Wirklichkeit existieren, sondern bloß, daß nur fünf beobachtet seien. Verwandt damit sind die Annahmen von dunklen Körpern, die die größere Häufigkeit der Mondfinsternisse oder vielleicht auch die Verschiedenheit der Erscheinungen bei diesen erklären sollten; dergleichen hat schon Anaximenes, dann die Pythagoreer und Anaxagoras ausgesprochen. Die seltsame indische Vorstellung von neun Planeten, wobei zu den sieben der aufsteigende und absteigende Mondknoten hinzugerechnet wurde, erklärt sich wohl aus dieser griechischen Annahme von solchen dunklen Planeten oder Trabanten.

Die Entwicklung der geozentrischen und der heliozentrischen Hypothese.

Die selbstverständlichste Voraussetzung, mit der das naive Denken noch heute fortgesetzt arbeitet, ist die zentrale ruhende Lage unserer Erde in der Gesamtwelt. Das Griechentum hat hier frühzeitig mit dem unmittel-

baren Sinnenschein gebrochen; es hat beide Hypothesen, die geozentrische wie die heliozentrische, zur Durchführung zu bringen versucht. Philolaos, einer der Pythagoreer des 5. Jahrhunderts, hat in seinem Weltsystem zum erstenmal, soweit unsere Kenntnis reicht, die heilige Erde aus dem Mittelpunkt entfernt; um den neuen Herd des Weltalls, das Zentralfeuer, bewegen sich zuoberst die Fixsternsphäre, dann die fünf Planeten, Sonne und Mond, Erde und Gegenerde. Die Erde wird ein Stern unter Sternen — das ist die ungeheuere Tragweite dieses Fortschrittes. Noch ist die Sonne, der unermüdliche Wanderer des Himmels, nicht feststehend geworden; auch sie, die gleich dem Monde kein eigenes Licht besitzt, sondern das Licht des Zentralfeuers und des äußersten Lichtkreises aufnimmt, kreuzt noch mit den Planeten um das Zentrum. Das System des Philolaos macht die Bahn frei für die ganze folgende Entwicklung der griechischen Astronomie. Die willkürliche Annahme der Gegenerde, wie die des Zentralfeuers, mußte bald fallen. Aber an Stelle der Bewegung der Erde und Gegenerde um das Zentralfeuer trat nun bald die Bewegung der Erde um ihre eigene Achse, die zuerst die Pythagoreer Ekphantos und Hiketas forderten. Für das Zentrum der Welt aber boten sich zwei Möglichkeiten dar. Die eine These, die auf griechischem Boden die Herrschaft behalten hat und in den Systemen des Eudoxos, Aristoteles, Hipparch, Ptolemaios gipfelt, nimmt wiederum die Erde als Mittelpunkt der Welt an und sucht von hier aus die himmlischen Bewegungen zu erklären. An Stelle des Zentralfeuers tritt also wieder die Erde als heiliger Herd des Weltalls. Diese Lehre erreicht ihren letzten Ausbau in dem ptolemäischen Weltsystem, das in Nachfolge der Theorien des Apollonios und Hipparch mit Ekzentern und Epizyklen den Bewegungen der Planeten gerecht zu werden versucht und nahezu vermag. Aber die wachsende Vertrautheit mit den Erscheinungen des Himmels führte schon im 4. Jahrhundert v. Chr. zu der Aufstellung, daß Merkur und Venus nicht um die Erde, sondern um die Sonne sich bewegen. Ähnliche Beobachtungen über die wechselnde Lichtstärke hatte man auch bei dem Planeten Mars vielleicht schon in Babylonien gemacht; und seine Bahn schien sich besser verstehen zu lassen, wenn man auch für sie und dementsprechend für alle Planeten die Sonne zum Mittelpunkt machte, nicht die Erde. Die Sonne aber ließ diese Ansicht ebenfalls noch um die Erde kreisen. Dieses System, das man später nach Tycho de Brahe, dem großen dänischen Astronomen des 16. Jahrhunderts, das tychonische nannte, ist mindestens für Venus und Merkur wohl zuerst von Herakleides von Pontos, Platons Schüler, ausgesprochen worden. Endlich das dritte und kühnste System hat auch darauf endgültig verzichtet, der kleinen Erde ihren Vorrang in der Welt weiter zuzugestehen; konnte sie schon bei Philolaos um das Weltfeuer kreisen, so konnte sie auch um die Sonne bewegt gedacht werden gleich allen anderen Planeten. So schließt sich an die Weltkonstruktion des Philolaos spätestens im 3. Jahrhundert v. Chr. auch das kopernikanische Welt-

Aristarch und Seleukos (3. und 2. Jahrh. v. Chr.).

system an, vertreten von Aristarch von Samos und Seleukos von Seleukeia am Tigris. Kopernikus hat sehr wohl gewußt, daß seine entscheidende Erkenntnis ihm von dem Griechen des 3. Jahrhunderts v. Chr. vorweggenommen war: in der gedruckten Widmung seines Werkes spricht er zwar nur von jenen Pythagoreern Ekphantos und Hiketas und von Philolaos, dem er zu Unrecht die erste Entdeckung seines Systems beimißt; aber in dem handschriftlichen Entwurf zeigt sich, daß er auch Aristarch gekannt hat. Die neue Lehre hat ihre Verteidiger gefunden, und Seleukos soll die geometrische Konstruktion des Aristarch auch bewiesen haben. Und doch hat ihr die Kraft gefehlt, sich zu behaupten. Sie fand nicht nur bei den Zionswächtern der Stoa, sondern auch bei den Aristotelikern scharfen Widerspruch, obgleich Aristarch selbst der Schüler des großen, jedoch auch vom Atomismus beeinflußten Physikers aus Aristoteles' Schule, des Straton von Lampsakos, gewesen war. Der letzte tüchtige Aristoteleskommentator, Simplicius, läßt jene Abneigung der peripatetischen Schule gegen die Neuerung deutlich genug merken; er ist darum auch zu der zweifelhaften Ehre gekommen, in Galileis Dialogo den mit Überlegenheit ad absurdum geführten Vertreter der alten Lehre zu spielen. Es ist aber wohl auch die innere Schwäche der Begründung gewesen, die die heliozentrische Auffassung im Altertum nach kaum 100 Jahren verstummen ließ; es fehlte ihr die Unterstützung durch eine ausreichende wissenschaftliche Physik, so wenig auch die Vorstellung von der Anziehungskraft der Sonne den Alten fremd war, und die von Aristarch noch nicht aufgegebene Voraussetzung reiner Kreisbahnen der Planeten um die Sonne zeigte sich als unhaltbar. So hätte sich die Darstellung der Planetenbahnen nur in unwillkommener Weise kompliziert. Aus allen diesen Gründen gelang es dieser Hypothese nicht, die vielfachen Widerstände, den Widerspruch des „gesunden Menschenverstandes", die Polemik der Philosophenschulen, die Aufreizung des religiösen Gefühls, die Konkurrenz durch die bedeutenden Vertreter der geozentrischen Auffassung zu besiegen. Es blieb bei der letzteren, die auch allein mit der immer mächtiger werdenden Astrologie sich vertragen konnte. Die Anstrengungen, die vor allem von Hipparch und Ptolemaios gemacht wurden, um von der Erde aus die Bewegungen der Planeten zu begreifen, sind heroisch gewesen und von einem solchen Erfolg gekrönt worden, daß es vieler Jahrhunderte bedurfte, ehe das System seine Unvereinbarkeit mit den natürlichen Erscheinungen unabweisbar erkennen ließ und der stolze Bau zusammenbrach.

Die Unendlichkeit des Weltalls.

Die Neugestaltung des Weltbildes durch die griechische Wissenschaft wäre nur unvollständig bezeichnet, wenn nicht schließlich noch auf eine weitere unerschrockene Konsequenz griechischen Denkens hingewiesen würde: die Lehre von der Unendlichkeit des Weltalls. Sie ist, nachdem Anaximander zwar ein unendliches Nacheinander, aber nicht ein Nebeneinander von ungezählten Welten gelehrt hatte, zuerst von Demokrit ausgesprochen worden, der auch vor andern eine völlig moderne Erklärung der von so

vielen Sagen umwobenen Milchstraße als einer Anhäufung von zahllosen Sternen gegeben hat. Für ihn ergab sich aus der von ihm zwar nicht zuerst gelehrten, aber erst völlig durchgeführten und ausgebauten Atomistik notwendig die Unendlichkeit der Welten. Seine in ewiger Bewegung befindlichen Atome sind unendlich an der Zahl, und der Raum ist grenzenlos; daher wird aus ihnen nicht bloß eine Welt, sondern es müssen unendliche Welten, der Zeit wie dem Raum nach unendlich, entstehen, die sich durch ihre Größe unterscheiden: in einigen, meinte er, gebe es weder Sonne noch Mond, in anderen aber eine größere Sonne und einen größeren Mond als bei uns, und in anderen auch eine größere Zahl von Sonnen und Monden. Die Abstände der Welten hielt er für ungleich; da gebe es mehr, dort weniger Welten. Die einen sind im Begriffe zu wachsen, die anderen in ihrer Blüte, die dritten im Vergehen. Ihr Untergang aber wird wieder durch rein mechanische Gründe bewirkt, durch ihr Zusammenstoßen. Epikur und seine große und weit verbreitete Schule haben die Lehre weiter getragen, die in den wie aus mächtigen Quadern gefügten Versen des Lukrez ihre wirksamste Ausgestaltung erhielt:

Denn es sucht der denkende Geist, da unendlich der Raum ist
Außer den Mauern der Welt um uns, was weiter noch dasei,
Daß er in eigener Kraft hinstrebe des freien Gedankens.
Wenn sich ins Endlose dehnt nach allen Seiten der Weltraum
Und in unzählbarer Zahl und in allen Gestalten die Keime
Schwärmen umher im Fluge, von ewiger Unrast getrieben:
Ist's im Geringsten da noch wahrscheinlich zu heißen, nur dieser
Erdkreis habe sich rings, nur dieser Himmel gebildet,
Nichts geschaffen darüber hinaus die Fülle des Urstoffs?

War Demokrits Vorstellung von der Größe der einzelnen Himmelskörper und so auch unserer Welt sicherlich noch bescheiden, so ist Aristarch, in klar ausgesprochener Konsequenz seiner heliozentrischen Auffassung, zu der Lehre gekommen, nicht nur die Erde selbst, was längst gelehrt wurde, sondern ihre Bahn um die Sonne müsse im Vergleich zu der Fixsternsphäre als ein bloßer Punkt im Vergleich zur Kugeloberfläche, d. h. als unendlich klein gelten: hätte doch sonst beim jährlichen Umlauf der Erde sich das Bild des Fixsternhimmels merkbar verschieben müssen Hier wird zum erstenmal versucht, die unendliche Größe des Weltalls zu vollem Bewußtsein zu bringen; Aristarch ist auch in diesem Argument der direkte Vorgänger des Kopernikus. *Discedunt moenia mundi.*

Die Himmelsbeobachtung und ihre Hilfsmittel bei den Griechen.

Es ist ein ungeheuerer Weg von den einfachen Vorstellungen der homerischen und hesiodischen Poesie und dem für die Masse des griechischen Volkes gewiß stets in Geltung gebliebenen Weltbild bis zu Aristarchs heliozentrischem System und dem großartigen Bau, den Ptolemaios aus den von größeren Vorgängern behauenen Werkstücken aufführte. Der Weg wäre nicht zurückzulegen gewesen ohne die starke Anregung, die schon die älteste griechische Wissenschaft und dann wieder besonders Hipparch vom Orient empfangen hat, und vor allem ohne die mächtige

Entwicklung der griechischen Mathematik. Auch unmittelbare Beobachtung aber ist von den Griechen auf diesem Gebiet ausdauernder geleistet worden als auf manchem anderen, wo der griechische Geist nicht selten viel zu ungeduldig die sorgfältige Feststellung aller Voraussetzungen überspringt, um sofort nach philosophischer Deutung zu greifen. Ein Gelehrter wie Hipparch dagegen trägt ganz die Züge eines sorgsamen und bis ins letzte peinlich genauen Beobachters, daher er denn auch mit klarem Bewußtsein auf die Aufstellung eines neuen Weltsystems verzichtet.

Beobachtung des Himmels war in Griechenland allezeit für Jäger und Ackerbauer und Seefahrer unumgänglich. Zwar wird da und dort in hellenistischer Zeit, ja schon seit Meton im 5. Jahrhundert v. Chr., ein monumentaler Kalender nach den Sternauf- und -Untergängen aufgestellt, später wohl auch eine Kalenderuhr großen Maßstabes auf öffentlichen Gebäuden angebracht, wie man sie vor nicht allzu langer Zeit in Salzburg, dem römischen Juvavum, gefunden hat. Aber das war natürlich doch nur an einzelnen Orten möglich. Wie stark das allgemeine Bedürfnis nach Kenntnis und Beobachtung des gestirnten Himmels war, lehrt der unermeßliche Erfolg eines griechischen Gedichtes, das über Sternbilder, Auf- und Untergänge und Wetterzeichen mit feiner Kunst unterrichtete. An dieses Gedicht des Aratos (erste Hälfte des 3. Jahrhunderts v. Chr.), das in Rom nicht weniger als drei Übersetzer gefunden hat, von den Nachahmern zu schweigen, hat sich eine ganze Literatur von mehr oder weniger populären Sternbüchern bis ins griechische und lateinische Mittelalter hinein angeschlossen. Wie groß aber auch die Zahl der Orte war, an denen in Griechenland astronomische Beobachtungen angestellt wurden, zeigt ein Verzeichnis am Schluß eines der kleineren Werke des Ptolemaios, der Phaseis. Am meisten Kontinuität war wohl auf Rhodos und besonders in Alexandria zu finden. Die Sternwarten waren nicht bloß mit Himmelsgloben, die gleich den Erdkarten frühzeitig zum Apparat jeder höheren Schule gehörten, sondern auch mit zahlreichen anderen Instrumenten, Gnomon, Skaphe, Krikos zur Beobachtung der Äquinoktien, Mauerquadrant, mächtigen Armillarsphären und Astrolabien ausgestattet. Ein so kunstvolles Werk wie das durch Wasser getriebene Planetarium des Archimedes oder die gewiß einfacheren des Eudoxos und des Poseidonios — vielleicht sind Trümmer eines ähnlichen Werkes, eine Anzahl von feingearbeiteten Zahnrädern aus Bronze mit Inschriften, kürzlich auf dem Meerboden bei Antikythera gefunden worden — waren wohl weniger dazu bestimmt, auf der Sternwarte gebraucht zu werden, als den Gang der Planetenbewegungen im Unterricht und für den Laien zu veranschaulichen.

Aratos.

Das eigentlich Bezeichnende an der Entwicklung des griechischen Weltbildes liegt jedoch nach der spekulativen Seite. Es ist von der höchsten Bedeutung gewesen, daß die griechische Religion mit irgendwelchem Dogma nichts zu tun hat. Wohl konnte es vorkommen, daß gegen einen lauten und unerschrockenen Propagator wie Anaxagoras die Massen selbst

Der Anteil des griechischen Geistes am modernen Weltbild.

in Athen mit Erfolg aufgestachelt wurden; und den Aristarch von Samos hat der fromme Stoiker Kleanthes öffentlich vor allen Hellenen in einer besonderen Schrift wegen Gottlosigkeit angeklagt, „weil er den heiligen Herd des Weltalls verrücke, indem er die Hypothese aufgestellt habe, daß der Himmel ruhe, die Erde sich dagegen in dem schiefen Kreis der Ekliptik bewege und zugleich sich auch um ihre Achse drehe.“ Es berührt seltsam, wenn man in dem Widerruf, den etwa 2000 Jahre später der damals siebzigjährige Galilei vor dem heiligen Offiz leisten mußte, genau die gleichen zwei Schuldbekenntnisse liest, er habe für wahr gehalten und geglaubt, daß die Sonne im Mittelpunkt der Welt und unbeweglich sei, und daß die Erde nicht der Mittelpunkt sei und sich um sich selbst bewege. Aber wir hören nichts davon, daß Aristarch durch die Anklage seines Gegners irgendwelche Unannehmlichkeiten widerfahren seien; daß gar irgendeine Priesterschaft sich etwa der Anklage angenommen hätte, ist für jeden, der den griechischen Kultus auch nur einigermaßen kennt, gar nicht vorstellbar. So fehlte hier zu dem wohlorganisierten Apparat der Inquisition jeder Ansatz. Die griechische Wissenschaft wie die griechische Kunst hat sich frei von der hieratischen Befangenheit des Orients entwickelt.

Kosmos.

Die große und erhabene Arbeit der griechischen Astronomie war es, die strenge Gesetzmäßigkeit in dem Gange der Planeten wie im Bau des Weltalls zu finden. Das Wort Kosmos, Wohlordnung, haben wir von ihnen empfangen. Der erste, der die Welt so genannt hat, war nach unserer Überlieferung Pythagoras oder Parmenides, der Schüler der Pythagoreer. Das Wort sagt im Grunde das gleiche wie der mit griechischer Unbedingtheit formulierte Grundgedanke der ganzen pythagoreischen Lehre, für die nach Philolaos' Ausdruck die Zahl das Wesen der Dinge und der ganze Himmel Harmonie und Zahl ist. Und ganz die gleiche Anerkennung eines unbedingt geltenden Weltgesetzes spricht aus dem Satz des Heraklit: „Die Sonne wird ihre Maße nicht überschreiten; sonst werden sie die Erinyen, die Schergen der Dike, ausfindig machen.“ Die religiöse Formulierung ist hier aber nicht so wesentlich wie bei den Pythagoreern und Platon. Denn gerade an diesen für den weiteren Fortschritt entscheidenden Punkten des Weges sind in der Tat recht eigentlich religiöse Gedanken von größter Bedeutung gewesen. Freilich religiöse Gedanken in einem weit größeren Sinne, als es der Glaube an irgendeinen lokal und zeitlich bedingten Gott, wie ihn die Orientalen und die griechischen Staaten verehrten, oder auch die Verehrung eines einzelnen Himmelskörpers, oder gar der Glaube an einen zum Dogma erstarrten Mythus hätte sein können. Ihr Geist ist ergriffen von der unendlichen Hoheit und Schönheit des Weltgebäudes, das vom Göttlichen nicht nur getragen, sondern erfüllt zu denken ihnen eine Notwendigkeit ist. So findet es noch der strenge und gegen die Freiheit auch des Denkens hart gewordene Sinn des gealterten Platon, wie er in dem Werke seines höchsten Alters uns entgegentritt,

doch nur befremdend, daß man es nicht für fromm und gottgefällig ansehen wolle, den höchsten Gott und das Weltall zum Gegenstand der Forschung zu machen. Die herrliche Ordnung in diesem Weltall aber verlangte den Nachweis möglichst einfacher, gleichmäßiger und vollkommener Bewegungen; und nichts schien dem mathematischen Sinn so vollkommen als die Kugel, keine Bewegung der Hoheit und Göttlichkeit himmlischer Körper würdiger als die Kreisbewegung. Eine echt mathematische Freude an der Regelmäßigkeit dieser Gestalt und Bewegung verbindet sich hier mit einer religiösen Forderung. Die Anschauung von der geheimnisvollen Schönheit, ja Göttlichkeit der Kugel, die zugleich begrenzt und unbegrenzt heißt, weil der Kreis ohne Anfang und Ende zu sein scheint und dennoch in sich geschlossen ist, verkündete ein kühler Denker wie Aristoteles kaum weniger emphatisch als Platon nach dem Vorbild der Pythagoreer. Wenn die Griechen die Kugelform auch auf den Kosmos übertrugen, so ist das zunächst ein, freilich durch tiefe Gedanken gefördertes, Vorurteil; aber man versteht dieses Vorurteil, wenn man sich klar macht, daß an der Regelmäßigkeit der Himmelserscheinungen der Gedanke an eine durchgreifende gesetzmäßige Ordnung im Weltall erst groß geworden ist, daß also die einfachste Überlegung die regelmäßigste und in sich geschlossenste Form gerade für das Weltgebäude fordern mußte. Das Vorurteil ist auf jeden Fall eines von jenen gewesen, die für die Erkenntnis unendlich fruchtbar geworden sind. „Welche Voraussetzungen notwendig seien, um durch gleiche, kreisförmige, geordnete Bewegungen die bei den Planeten beobachteten Erscheinungen zu retten", das ist das Problem, das Platon den Astronomen seiner Schule gestellt hat; und die ganze weitere Arbeit hat sich vollkommen in diesen Gleisen bewegt. Wenn noch einer der letzten Vertreter der Schule von Athen, Proklos, die Forderung des Pythagoras wiederholt, man müsse mit Hilfe der wenigsten und einfachsten Hypothesen zur Lösung der Probleme schreiten, weil solche den göttlichen Körpern angemessener seien, so ist das leitende Motiv des Kopernikus auch darin mit griechischen Gedanken wieder völlig im Einklang. Vielleicht wird auch Keplers Mysterium cosmographicum und Harmonice mundi dem modernen Astronomen jene „Träume der Pythagoreer", wie man sie einst hieß, und ihrer griechischen Nachfolger verständlich machen können. Auch Kepler hat geglaubt, daß sein Weltbaumeister die größte Freude an mathematisch ausdrückbaren reinen Zahlenverhältnissen haben müsse; und die stolzen Worte, mit denen er die wunderbare Erkenntnis seines dritten Gesetzes verkündet: „Ich habe ans Licht gebracht, daß die ganze Natur der Harmonie in ihrem ganzen Umfang und mit allen ihren Einzelheiten in den himmlischen Bewegungen vorhanden ist", diese Worte zeigen, wie für ihn die Lehre von der Welt als Zahl und Harmonie so gut wie im griechischen Weltbild eine treibende Kraft gewesen ist.

Das Mittelalter.

Das christliche Mittelalter im Osten wie im Westen lebt im wesent-

lichen von den vielfach verblaßten Erinnerungen an die astronomischen Anschauungen des Altertums, soweit sie dem Christentum ungefährlich schienen; der Versuch eines biblischen Weltbildes durch den byzantinischen Mönch Kosmas Indikopleustes (im 6. Jahrhundert) landete allerdings wieder bei der Erde als einer vom Ozean umflossenen Scheibe, auf der der kastenförmig gewölbte Himmel aufruht, also im Grunde beim altbabylonischen Weltbild. Allein schon der Patriarch Photios hat diesen Versuch scharf abgelehnt. Die Scholastik aber ist völlig beherrscht von dem Weltbild des Aristoteles und Ptolemaios, das für sie nicht minder kanonisch war als die aristotelische Philosophie. Wohl mochten die mittelalterlichen Gelehrten bei Cicero und Plinius und manchem anderen noch allerlei Hinweise auf abweichende Lehren finden; aber das konnte in seiner Isolierung keinen Einfluß ausüben, zumal die ganze Überlieferung der rechnenden Astronomie dem lateinischen Mittelalter verloren war. Und so klingt die Sphärenharmonie der Pythagoreer nur wie ein wundersamer Traum aus einer versunkenen Vorzeit noch in der köstlichen Schulstunde wieder, die die Nonne Hrosvitha in ihrem Drama Paphnutius durch den frommen Einsiedler erteilen läßt. Weit wichtiger als die bloße Rezeption der abendländischen Völker ist die Tätigkeit der Araber, die in vielen wesentlichen Punkten die Beobachtungen und Kataloge des Ptolemaios ergänzten und verbesserten. Aber ein neues Weltbild haben sie nicht geschaffen; es blieb beim geozentrischen, also beim Erbe des Altertums. Das übernimmt dann durch arabische Vermittlung das spätere lateinische und griechische Mittelalter und mit neuer Kraft die Renaissance; und wie mit ihr die neue Epoche der europäischen Geistesgeschichte beginnt, in der wir noch heute leben, so schafft sie auch in der Nachfolge der verlorenen Grundgedanken des Aristarch von Samos, aber bald auf dem festeren Grunde einer neuen Physik und Mechanik des Himmels unser heutiges Weltbild.

Die Araber.

III. Die Astrologie und ihre Weltanschauung. Mit dem siegreichen geozentrischen Weltbild hat das untergehende Altertum dem Mittelalter und der anbrechenden neuen Zeit einen Glauben übermittelt, den Wissenschaft und Religion als ihr Zwitterkind zwischen sich gehegt hatten: die Astrologie. Seit der Aufklärung ist sie zwar nicht völlig verschwunden, aber so stark zurückgetreten, daß sie den Modernen meist nur als eine seltsame, fast unbegreifliche Verirrung und nur als die sporadische Verkehrtheit einiger abergläubischer Toren erscheint. Wer ihrer Geschichte näher tritt, muß sich immer mehr überzeugen, daß die Sache in Wahrheit ganz anders liegt. Sie hat nicht nur infolge ihrer praktischen Bedeutung die wissenschaftliche Astronomie durch dunkle Jahrhunderte gerettet, sondern sie hat eine förmliche Weltanschauung gebildet, die in der merkwürdigsten Weise mit wahren und vermeintlichen Fortschritten des Denkens, aber auch mit den heißen Wünschen und den törichten Hoffnungen

der Menschen wie mit ihrem abgründigsten Fatalismus sich zu verbinden vermochte.

Die Geschichte der Astrologie im Altertum.

Die Astrologie ist der Glaube an die Sterne als die Schicksal verleihenden, mindestens aber Schicksal verkündenden Mächte und der Versuch, diesen Willen der Götter mittels einer bestimmten Technik zu ergründen. Sie ist also ihrem Ursprung nach identisch mit einem religiösen Glauben, der in den Sternen nebst Sonne und Mond die sichtbaren Götter sieht, oder irgendeinmal im Laufe seiner Entwicklung seine bisherigen Götter, die Gottheiten einzelner Städte und Landschaften, mit ihnen identifiziert. Eine solche Religion hat es wohl kaum schon in der sumerischen Zeit, wohl aber in der babylonischen im Zweistromlande gegeben, und hier ist auch der Ausgangspunkt der Astrologie. Auch hier hat sie allerdings nicht von vornherein geherrscht; das lehrt außer anderem auch die Tatsache, daß man auch in Babylon keineswegs nur aus dem Himmel, sondern ebenso sehr, ja zunächst wohl überwiegend aus der zu einem ganzen System durchgebildeten Leberschau und weiterhin auch durch Orakel, Träume, Becherschau, Tieromina und andere Methoden der Wahrsagung, die mit dem Himmel nichts zu tun haben, die Zukunft zu ergründen hoffte. Wie nun aber die Leber, nach babylonischer und auch sonst verbreiteter Auffassung der Sitz der Seele, beim Opfertier in den Besitz des Gottes übergeht, von ihm „besessen“ wird und darum aus ihr die Zukunft entnommen werden kann, so müssen auch die Sterne, wenn sie der Sitz der Götter oder selbst die eigentlichen Götter sind, unmittelbar deren Willen verkünden. Das schon erwähnte astrologische Werk, die mindestens 66 Tafeln umfassende Sammlung aus König Assurbanipals Bibliothek, zeigt uns, daß die babylonische Astrologie vor allem für den Staat und für den König von Bedeutung war, deren Schicksal der priesterliche Astrolog aus den Sternen las; aber die Kunst der „Chaldäer“ muß doch, wie wir seit dem 4. Jahrhundert v. Chr. aus gelegentlichen Äußerungen griechischer Schriftsteller über sie ersehen, wenigstens in der Spätzeit sich auch mit den Schicksalen anderer Menschen befaßt haben. In Griechenland ist die babylonische Astrologie in der klassischen Zeit völlig ohne Einfluß auf Dichten und Trachten; das können wir aus Tragikern und Komikern, Rednern und Historikern mit Sicherheit entnehmen. Es wäre unverständlich, wenn die Griechen, von denen nicht wenige wißbegierig die alten Kulturländer im Osten aufsuchten, nicht schon vor Eudoxos, ja zur Zeit des Thales, von der Macht der Sterndeutung bei den Babyloniern gewußt hätten; aber es lag ihnen damals noch vollkommen fern, dieses Mittel neben Orakel und Opferschau und Tempeltraum zur Erkundung der Zukunft heranzuziehen. Die pythagoreische Mystik hat die Prinzipien der Astrologie nicht völlig ignoriert, ohne doch von hier die entscheidenden Impulse zu empfangen. Aber seitdem Alexander der Große die Tore des Ostens weit aufgestoßen hatte und das Griechentum bis an den Indus vordringt, da empfängt es als eine der nachhaltigsten Gegengaben des Orients auch jenen Glauben an die Sterne.

Wichtiger als Berossos und jene Chaldäer, die die neue Lehre durch ihre Schriften aus Babylon zu den Griechen bringen, ist die Aufnahme der chaldäischen Astrologie in dem uralten Märchenlande am Nil geworden, vor dessen grauer Weisheit und jahrtausendealter historischer Überlieferung die Griechen sich wie Kinder fühlten. Hier wurde ebenfalls, soviel wir bis jetzt wissen, die Astrologie erst in der Zeit nach Alexander dem Großen aufgenommen als Schöpfung des ägyptischen Hermes, des Gottes Thoth; unter dieser Flagge hat sie die hochmütige Priesterschaft dieses konservativsten aller Völker der Welt nicht nur geduldet, sondern selbst mit Hingebung ergriffen, wie die späten Tempel von Edfu, Dendera, Esne, Athribis durch zahlreiche Gemälde lehren. Auf die Offenbarung des Thoth in griechisch geschriebenen „Hermetischen" Büchern beruft sich das Werk, das unter dem Namen eines alten Priesters und eines alten Königs, des Petosiris und des Nechepso, nicht später als 150 v. Chr. geschaffen, in griechischer Sprache das erste große System der Astrologie gab, mit manchen wörtlichen Anlehnungen an babylonische Tafeln, aber nicht ohne eine starke, lokal bedingte Selbständigkeit. Der Einfluß der Astrologie in dem ganzen ungeheuren Gebiet der griechischen Weltsprache wächst seitdem immer mehr; nur der Skeptizismus, der freilich alle Wissenschaft überhaupt leugnet, und der Epikureismus, dessen Götter sich um die Welt nicht kümmern und dessen unzählige Welten durch Zufall aus den Atomen entstehen, sind vor ihm sicher. Alle anderen Philosophenschulen sind, wenn nicht der Praxis, so doch der Theorie der Astrologie, allerdings mit starken Abstufungen, verfallen; Astronomen wie Hipparch und Ptolemaios gehören, der erstere mehr aus religiös-mystischen Gründen, der zweite in der Absicht, eine vermeintliche Kosmophysik zu finden, in verschiedenen Graden zu ihren Adepten; und aus Tacitus mag man sehen, wie tief auch ein Römer von so stolzer Art unter dem Druck des orientalischen Gestirnglaubens und Fatalismus gestanden hat. Römische Legionen tragen auf ihren Feldzeichen seit Augustus nicht griechisch-römische Götterbilder, sondern die alten babylonischen Tierkreiszeichen in alle Lande; die Lehre des persischen Mithras verbindet sich mit dem Glauben an die Wochentags- und Tierkreisgötter und dem Sonnenkultus. Im täglichen Leben beherrscht die Astrologie jeden Entschluß zu irgendeinem Tun: Tag und Stunde, nicht nur von Kriegserklärung und Herrschaftsantritt, von Hochzeit und Sklavenkauf, von Aderlaß und Reisebeginn, sondern ebenso gut von Bad und Kleiderwechsel und Festmahl bestimmen die Gestirne; und wem die Astronomie zu schwierig ist, der liest wenigstens aus dem Wochentag des ersten Januar Witterungs- und Gesundheitsverhältnisse, Ertrag und politische Ereignisse des kommenden Jahres.

Astrologie im Mittelalter.

Die griechisch-römische Kultur überliefert dann die Astrologie an die Völker des Mittelalters, freilich in sehr verschiedenem Maße: während der Fatalismus des Islam ihr von vornherein stark entgegenkommen mußte

(noch der vor wenigen Jahren entthronte Sultan stand, wie die Zeitungen berichteten, völlig unter dem Einfluß seines Hofastrologen), hat die christliche Kirche der Astrologie zuerst den schärfsten Widerstand geleistet; und zwar mit unzweifelhaft starkem Erfolge. Aber da die Tatsache der Sterndeutung und ihre Richtigkeit im Matthäusevangelium durch den Stern von Bethlehem, den die Magier im Aufgange gesehen hatten, und durch manche andere Bibelstelle ihre Bekräftigung erhielt, so wurde die geradezu ungeheure astrologische Literatur des Altertums in griechischer Sprache durch byzantinische Handschriften in noch immer gewaltigem Umfang, wenn auch nur in Auszügen und Proben für uns erhalten, und im 15. und 16. Jahrhundert ist sie dem Abendland bekannt geworden. Schon im 9. Jahrhundert regen sich nach nicht gar langer Unterbrechung in Byzanz die unterdrückten Lebensgeister der Sterndeutung, die sich in einer Erscheinung wie Leo dem Philosophen wirksam verkörpert; und im 12. Jahrhundert konnte ein byzantinischer Kaiser, Manuel Komnenos, die Astrologie, der er leidenschaftlich und mit unbedingtem Glauben anhing, aus der Heiligen Schrift und den Kirchenvätern gegen ihre Widersacher verteidigen, deren kühnster Vertreter wohl ebendafür mit dem Verlust des Augenlichtes büßte. Im Abendland war die Opposition der Kirche dadurch erleichtert, daß die lateinische astrologische Literatur viel weniger umfangreich war; so ist hier zunächst diese heidnische Wissenschaft völlig zurückgedrängt worden; doch behaupten sich mit merkwürdiger Zähigkeit auch hier primitive Mondwahrsagebücher und ähnliche auch für völlige Laien verständliche und brauchbare Hilfsmittel, die zuletzt in der Hauptsache auf babylonische Vorlagen zurückgehen. Aber mit dem mächtigen Strom orientalischer und griechischer Weisheit, der durch die großartige Übersetzertätigkeit in Spanien und Süditalien in die Scholastik sich ergießt, wird das Abendland auch mit der Astrologie wieder neu vertraut; Michael Scotus' († 1234), des Hofastrologen Kaiser Friedrichs II., große Naturphilosophie ist von astrologischem Geiste durchdrungen, Albertus Magnus kennt eine unheimliche Fülle astrologischer, erlaubter und verbotener, Schriften; und wie man schon zur Zeit des heiligen Augustin zu dessen unverkennbarer Beunruhigung dem Christentum aus den Sternen nur ein Leben von 365 Jahren geweissagt hatte, so wagt nun ein christlicher Denker, Roger Bacon, die vier Weltreligionen in Anlehnung an arabische Vorgänger auf Konjunktionen des Jupiter mit den anderen Planeten zurückzuführen, die christliche auf die mit Merkur: der Hermes Logios, der sich im Planeten Merkur verkörpert, trat für den Logos des vierten Evangeliums ein. Cecco d'Ascoli starb 1327 in Florenz auf dem Scheiterhaufen, weil er die Nativität Christi berechnet hatte. Auch die Frommen aber konnten sich entweder damit beruhigen, daß nur der Körper, aber nicht der freie Wille des Menschen der Macht der Sterne unterliege, oder zu der alten, feinen Unterscheidung zurückkehren, daß die Sterne zwar nicht selber das Schicksal machen, aber es im Auftrag Gottes andeuten.

Und so kommt nun die Zeit herauf, wo ein italienischer Condottiere oder Tyrann, aber auch ein Prälat ohne seinen Astrologen keine Entscheidungen mehr treffen kann; wo, geheimnisvoll am lichten Tag, in den Fresken italienischer Renaissancepaläste die Mysterien der Sterndeutung vorgeführt werden, und deutsche Könige und Fürsten wie König Wenzel oder Ottheinrich von der Pfalz sich kostbare astrologische Handschriften anfertigen lassen; wo päpstliche Konsistorien von dem Stern der Stunde abhängig gemacht werden, den der Astrolog berechnet, und Leo X. an der Sapienza, der päpstlichen Universität in Rom, eine Professur der Astrologie errichtet; wo Melanchthon das astrologische Handbuch des Ptolemaios herausgibt und ihr Recht verteidigt, und Tycho de Brahe seine Antrittsrede an der Universität Kopenhagen 1579 zu einer überzeugten und begeisterten Verherrlichung der Astrologie gestaltet; wo endlich Kepler für Wallenstein das Horoskop berechnen muß und der Sterndeuter während der Geburt Ludwigs XIV. im Zimmer weilt, um die beste mögliche Unterlage für das Horoskop zu gewinnen. „Hab' ich des Menschen Kern erst untersucht, so weiß ich auch sein Wollen und sein Handeln" ist uns aus dem „Wallenstein" geläufig; so wie der Feldherr das versucht hat, nämlich aus dem Blick in die nach bekanntem Schema aufgezeichnete Geburtskonstellation seiner Vertrauten und Feinde, so machten es damals ungezählte geistig hochstehende Menschen: noch haben wir handschriftliche Bände aus jener Zeit, in denen man die Horoskope berühmter Zeitgenossen sammelte, um ihr Wesen und ihr Schicksal daraus zu ergründen — die Sterne sagten, wie ein jeder sein mußte. Man braucht bloß einen Dichter des 16. und 17. Jahrhunderts in die Hand zu nehmen, um tausend Anspielungen auf diese Dinge zu begegnen. Bei Shakespeare kann sie jeder leicht in fast allen seinen Stücken finden; so mögen ein paar Verszeilen aus Ronsard diese Denkweise des 16. Jahrhunderts, hier mit stark christlicher Färbung, wiederklingen lassen:

Die Astrologie in der Renaissance.

Nun da der Abend unser Aug' umflort,
Betracht' ich zukunftssüchtig die Gestirne,
Durch die uns Gott in Lettern, wohl zu deuten,
Der Kreaturen Los und Schicksal kündet.
Denn der aus Himmelshöh'n den Menschen schaut,
Weist ihm aus Mitleid oft den rechten Pfad
In seiner Sternenschrift am Firmament
Und sagt das Glück, das Unglück uns voraus;
Doch wir, am Staube haftend, sündenschwer,
Verachten solche Schrift und sehn sie nicht.

Es hieße auf geschichtliches Verständnis verzichten, wollte man glauben, daß eine Lehre, die sich so viele Jahrhunderte lang vom äußersten Osten Asiens — denn auch nach China und Japan ist sie gedrungen — bis zu den Säulen des Herkules ausbreitete und ihrer ganzen Natur nach nicht wie so mancher andere Aberglaube an der dumpfen Masse eine zureichende Stütze fand, sondern je länger je mehr ernstlicher Beobachtung

Die theoretische Begründung der Astrologie.

und Berechnung bedurfte, und dabei noch leicht in schärfsten Widerspruch wenigstens zum christlichen Bekenntnis kam — daß diese Lehre schlechthin, wie es dem oberflächlichen Blick erscheinen muß, sinnlose Torheit gewesen wäre. Das vielfache Gelingen der Voraussagung, mag es auf glücklichem Zufall, auf der genauen Kenntnis der persönlichen und politischen Verhältnisse durch den Astrologen oder endlich vor allem auf der Vieldeutigkeit der Sterne beruhen, bei der etwas Richtiges sich immer einstellen mußte, kann die dauernde Wirkung nicht allein erklären; auch nicht das gewiß bei Laien sehr wirksame Vertrauen, das durch stetes Eintreffen der astronomischen Voraussagen auch für die astrologischen geschaffen wurde. Die zähe Lebensdauer der Astrologie entstammt im tiefsten Grunde doch einer Reihe anderer Faktoren, die hier wenigstens kurz angedeutet werden sollen.

Eine natürliche Neigung, die dem Menschen aus Urvätertagen vererbt ist, sieht sein Tun durch ungezählte, ihm geheimnisvolle Einflüsse von außen bedingt. Er sieht sich in einen großen Zusammenhang hineingestellt, von fremdem Willen und Tun abhängig und sich selber wiederum auf fremdes Tun mannigfach einwirkend. Da glaubt er in dem, was rings um ihn geschieht, notwendig Zeichen für das, was ihm geschehen wird, erkennen zu können; er sieht zunächst in allem Vorzeichen für alles. Das spielt auch bei sehr modernen und ganz freien Menschen noch seine Rolle; der Göttinger Professor der Physik, der uns erzählt, daß er, wenn ein frisch angestecktes Licht wieder ausgehe, seine Reise nach Italien danach beurteile, ist zugleich der geistreichste deutsche Satiriker und eindringendste Psycholog des 18. Jahrhunderts gewesen. So ist es von vornherein natürlich, daß die Sterne, die täglich zu unseren Häupten vorüberziehen, dazu der wechselnde Mond mit seinen Phasen, die Sonne mit Aufgang und Niedergang und vollends merkwürdige Neuerscheinungen am Himmel uns nicht weniger als die irdischen Dinge Vorzeichen zu geben scheinen. Himmel und Erde sind zudem ein dem natürlichen Menschen gegebenes, getrenntes und doch wieder zusammengehöriges Paar, wie es die primitive Kosmologie der Naturvölker zeigt; hat doch die Sprache den Zusammenklang der zwei Worte so wenig gelöst wie einst. Und so wird schon lange, ehe sich die Vorstellung von Göttern an die Sterne geknüpft hat, ein Komet mit seinem gewaltig drohenden Glanze ein Schreckbild für die Welt gewesen sein, oder die Feuerkugel, die vom Himmel herunterfällt, als unheilvolles Zeichen gegolten haben, wie sie im vierten Gesang der Ilias Troern und Achäern die Fortdauer des Krieges verkündet. Einmal aber kommt in der Entwicklung der Menschheit aus ihren Urzuständen die Zeit, wo der Anblick des unendlichen Glanzes droben den Menschen über seine Dämonenfurcht emporhebt und er dort große Götter sucht. Wenn die Götter aber dort droben wohnen, so hören wir auch ihre Stimme im Donner und Sturm und sehen ihre Zeichen im Blitz und Regenbogen, in der Feuerkugel und dem Kometen am Himmel auf-

leuchten. Und einmal wird dann auch erkannt werden, daß einige Sterne dort droben eine seltsam unregelmäßige Bahn gehen, abweichend von den Fixsternen. Hier wie bei den Kometen macht sich ein eigener Wille ganz besonders deutlich geltend; hier also vor allem werden die Götter unmittelbar eingreifen.

Die Babylonier haben zuerst ein astrologisches System geschaffen. In den uns vorliegenden Berichten der Hofastrologen an den König Assurbanipal und in ihren theoretischen Unterlagen ist dieses System noch außerordentlich einfach; wenn sie der Majestät des absoluten Herrschers, trotz der gelegentlich erwähnten übelwollenden Kritik eines Konkurrenten, nichts Besseres zu bieten hatten als jene kindlichen Mitteilungen von stets der gleichen Art: „Wenn der Mond von einem Fluß umgeben ist, so werden große Überschwemmungen und Gewitterstürme sein", oder „wenn der Mond von einem Hof umgeben ist und es steht Sirius darin, so werden Starke gefürchtet werden" und dergleichen mehr, so muß man gestehen, daß noch ein gar weiter Weg ist von hier bis zu den höchst komplizierten und tausend Möglichkeiten der Voraussagung gewährenden Systemen, wie wir sie später bei Griechen und Arabern und dann bei den Astrologen der Renaissance finden. Planetenhäuser und Exaltationen, die Stellung in Aufgang, Kulmination, Untergang und Gegenkulmination, die kleineren Bezirke, die den Planeten in jedem Tierkreisbild wechselnd zugeteilt werden, die gegenseitigen Aspekte der Planeten, die Schemata der zwölf Orte und der „Kleroi" oder Lose, die Mitwirkung der Sternbilder außerhalb des Tierkreises, dazu die Rolle der Zeitregenten, und weiter nun das Eindringen der Astrologie in Medizin, Alchemie, Steinkunde, Botanik, die Ausbildung einer eigentümlichen Geschichtsphilosophie und Völkerpsychologie — wie viel von alledem auch nur in den Anfängen babylonisch ist, wissen wir noch nicht. Aber das wichtigste Prinzip haben die Babylonier gegeben: die Zuteilung der Planeten an bestimmte Götter, wobei die Anregung zu den einzelnen Namen durch die besondere Farbe, die Lichtstärke und die Schnelligkeit der damit benannten Himmelskörper sich noch recht wohl erkennen läßt. Damit war die freundliche oder schreckliche oder auch wechselnde Wirkung dieser Planeten gesetzt. Die Griechen haben diese Namen, wie schon oben bemerkt, lediglich mit verwandt scheinenden eigenen Götternamen vertauscht. Mit diesen Planetengöttern und so auch mit den griechischen Namen der Sternbilder kommt freilich zugleich die ganze Fülle des griechischen Mythus herein, um die Deutungsmöglichkeiten ins Unendliche zu vermehren. Auf diesen Namen der Planeten und Tierkreisbilder, auch (freilich viel weniger) auf denen der anderen Sternbilder ruht im letzten Grunde alle astrologische Weissagung, in der naiven, aber wiederum in uralter Anschauung wurzelnden Annahme, daß mit dem Namen wirklich auch das Wesen getroffen und beherrscht werde. Die Planetennamen stehen nicht nur für die unbedingten Anhänger der Astrologie, sondern auch für einen Geist wie Dante so völlig

fest, daß sich für ihn die Auswahl der Seligen auf den einzelnen Planeten noch nach jenen heidnischen Namen richtet.

Die Astrologie und der religiöse Glaube.

Orientalische Gestirnreligion hat die Astrologie aus sich heraus geboren und ihr die ersten bestimmten Grundzüge gegeben. Als göttliche Offenbarung im genauesten Sinne des Wortes wird sie zu den Griechen getragen; und immer mehr vermag sie hier auf dem durch die pythagoreische und platonische Mystik bereiteten Boden einzuwurzeln. Der platonische Glaube von der Herabkunft der Seelen von den Sternen, auf die sie einst ausgesät wurden, und ihrem Wiederaufstieg zu den lichten Höhen, nachdem sie rein und göttlich geworden, kommt der Astrologie auf halbem Wege entgegen. Hat ja doch sogar der Volksglaube, wie schon früher angedeutet, noch in klassischer Zeit, sicherlich im 5. Jahrhundert v. Chr. vielfach die Heimat der Seele in oder auf den Sternen gesucht (Aristophanes ist der früheste Zeuge dafür); so ist es auch Volksglaube, nicht schon eigentliche, d. h. technische Astrologie, daß jedem sein Stern gegeben sei, der mit ihm entsteht und untergeht. Je größer und bedeutender der Mensch, desto heller sein Stern; und so muß bei der Geburt Jesu wie bei der des großen Mithridates und wiederum beim Tode des Cäsar ein leuchtender Stern erscheinen, der entweder den Einzug des viel ersehnten Heldenkindes in die irdische Welt oder aber die Aufnahme des neuen Gottes im Himmel verkündet.

Das astrologische Weltbild.

Die Astrologie hat freilich einen furchtbaren Druck auf Millionen von Menschen durch viele Jahrhunderte ausgeübt und sie zu willenlos zappelnden Marionetten in der Hand jener schicksalkündenden Götter gemacht. Und doch ist sie nicht wenigen Geistern vielmehr eine beruhigende und beglückende Gewißheit geworden, an der sie sich zum *amor fati* erzogen. Der Grund für diese seltsame Erscheinung liegt darin, daß die Astrologie nicht nur ein zum Aberglauben langsam heruntersinkender Glaube, sondern auch ein Weltbild großen Stiles war, und zwar von der Art, daß sie immer der Verbindung mit der Wissenschaft schon aus technischen Gründen bedurfte und von ihr mit umgestaltet wurde. Schon das aristotelische Weltbild, das bis tief ins 17. Jahrhundert hinein pflichtgemäß von den Kathedern verkündet wurde, hat trotz aller schroffen Trennung des fünften Elements von der übrigen Welt dennoch durch die im Äther sich bewegenden Gestirne allen Wechsel im Irdischen, zunächst den von Kälte und Wärme, entstehen lassen; von dort droben, wo alles ewig gleichen Gesetzen folgt, kommt die Bewegung in die irdische Unbeständigkeit herab, womit freilich noch nicht gesagt ist, daß wir nun auch zur Deduktion des irdischen Geschehens aus dem Himmelsbild im einzelnen befähigt und ausgerüstet sind. Vollkommen gerechtfertigt aber wird die Astrologie durch das einflußreiche Weltbild der Stoa; mit ihm, wie es die Mehrzahl der großen Stoiker vertreten hat, ist sie im letzten Grunde identisch. Eine unendliche Kette von Ursache und Wirkung, ein einziger großer Kausalnexus, ist nach der stoischen Lehre von der Heimarmene oder dem Fa-

tum von einem Ende der Welt zum anderen geschlungen; wie könnte aber irgend etwas eine größere Wirkung hervorbringen als die großen Weltkörper mit ihrer unablässigen, streng geregelten Bewegung im Raume? Man sieht, daß hier selbst die richtige Erkenntnis von der Größe der Welt und der einzelnen Gestirne bis zu einem gewissen Grade der Astrologie dienstbar werden muß: je riesiger die Weltkörper sind, desto stärker müssen sie das Irdische durch ihre Bewegung beeinflussen. Zugleich aber wird mit dieser unmittelbaren Wirkung der Gestirne auf die Erde ihnen in der Tat eine würdigere Rolle gegeben, als wenn sie in ihrer unermeßlichen Pracht und Herrlichkeit schließlich, wie es die religiös-geozentrische Weltauffassung aus der Bibel entnehmen mußte, doch nur dazu da waren, der kleinen Erde als Leuchtkörper und Zeitmesser zu dienen. Es paßte besser zu ihrer göttlichen Hoheit, wenn sie dem Menschen die Zukunft und den Willen der Götter nicht bloß verkündeten, sondern alles Geschehen im Irdischen unmittelbar bewirkten oder beherrschten. So hat das astrologische Weltbild vor den Augen des Poseidonios und anderer Stoiker gestanden; in halb wissenschaftlicher, halb religiöser Ergriffenheit haben sie hier vor allem zu sehen geglaubt, „wie alles sich zum Ganzen webt, eins in dem andern wirkt und lebt, wie Himmelskräfte auf- und niedersteigen und sich die goldnen Eimer reichen"; in diesem Bilde des Makrokosmos glaubten sie die unendliche Natur und die Quellen alles Lebens zu fassen. Die Frage, wie weit man nun im einzelnen diese Kräfte berechnen und zur Voraussage benützen könne, war fast gleichgültig gegenüber der Wucht des Grundgedankens; und doch versteht man, wie er immer wieder nicht bloß hoffnungsvolle Toren zu unermüdlich wiederholten praktischen und theoretischen Bemühungen anspornen konnte. Was von den Voraussagungen mißlang, fiel der unvollkommenen Ausbildung der Kunst aller Künste zur Last und brauchte die Seele dessen nicht zu entmutigen, der sich im innersten Einklang wußte mit dem großen Gesetze der Natur, mit dem Pulsschlag des Weltalls, und dem daher die Geisterwelt nicht auf die Dauer verschlossen bleiben konnte: wenn nicht die Genauigkeit seiner Schlüsse und Berechnungen, so mußte die unmittelbare Kraft der Intuition, die mächtige Glut der Seele, mit der er unablässig die himmlischen Sphären bestürmte, ihn zuletzt doch zur Erkenntnis in höherem Sinne, zur Gnosis, führen und ihm die Kräfte der Natur rings um ihn her enthüllen. Da tritt die religiöse Natur der Astrologie wieder in ihrer unlösbaren Verbindung mit der wissenschaftlichen Forschung besonders eindringlich hervor. „Quis caelum possit nisi caeli munere nosse, et reperire deum, nisi qui pars ipse deorum est?" In diesen Versen des römischen Dichters der Astrologie, Manilius, die Goethe am 4. September 1784 in das Brockenbuch schrieb, ist die ehrfürchtige Demut und der götternahe Stolz des im Innersten von seiner geheimnisreichen Kunst ergriffenen Astrologen am knappsten und eindrucksvollsten ausgesprochen. Sind die Sterne göttlich, so darf der Mensch, dessen Seele nicht minder göttlicher

Die Religiosität des Astrologen

Herkunft ist und einmal wieder zu jenen himmlischen Höhen zurückkehren wird, aus denen sie zeitweise verstoßen ist, sich der gläubigen Hoffnung hingeben, daß ihm diese Sterne, die dem Wesen seines Wesens verwandt sind, nicht stumm bleiben und nicht lügen werden. Nicht jedem allerdings mochten sie gleich deutlich sprechen: es galt das Irdische zu verachten, in strenger Askese den Leib zum gehorsamen Diener des Geistes zu machen und den Blick mit stetig gleicher Kraft emporzurichten zu den lichten Höhen, um als ein würdiger Priester der Sternreligion Tag für Tag mit den Göttern sprechen zu dürfen.

Das Ende der Astrologie.

Erst etwa seit dem Ausgang des 17. Jahrhunderts beginnt die Wissenschaft der Sterndeutung zu erbleichen vor dem neuen Tag, der mit grauer Dämmerung hereinbricht. Es wurde allmählich ein Spiel mit zu viel Faktoren, seit Galileo Galilei mit seinem Fernrohr in den „sieben“ Plejaden mehr als vierzig Sterne gezeigt hatte, seit der alte Mond an den Jupitermonden und denen der übrigen Planeten unerwartete Gesellen erhielt und bei den Planeten selber die geheiligte Siebenzahl durch Uranus und Neptun und gar die Hunderte von Planetoiden zerstört wurde. Mit dem schwer und langsam erkämpften Sieg des heliozentrischen Systems, der Verdrängung der Erde aus dem Mittelpunkt, so daß sich auf sie unmöglich das ganze Geschehen des Weltalls beziehen kann, ist die Niederlage der Astrologie besiegelt, und mit der Anerkennung der Unendlichkeit der Welt, wie sie Giordano Bruno als leidenschaftlicher Prophet verkündet, zerfallen auch die Grundlagen des alten Systems. Noch bannt im 18. und 19. Jahrhundert — warum nicht auch im 20.? — die Träumerei der Astrologen so manchen Gläubigen gerade unter den Tatmenschen, wie Stendhals Fabrizzio, der eine unüberwindliche Abneigung gegen Menschen hegt, die Vorzeichen leugnen oder Ironie dafür zeigen. Wohl haben sich noch mancherlei Reste des alten Glaubens, wie unsere Namen der Wochentage, in allen Kulturländern gehalten. Aber man braucht nicht selbst prophezeien zu können, um eine wirkliche Wiedererstehung der Astrologie unmöglich zu heißen.

Wer den Anfang von „Wahrheit und Dichtung“ nachschlägt, findet dort, wie es einst dem antiken Biographen des Neuplatonikers Proklos und wie es auch den Menschen der Renaissance nur natürlich war, das Horoskop dessen, der unter glücklicher Konstellation — „die Sonne stand im Zeichen der Jungfrau und kulminierte für den Tag, Jupiter und Venus blickten sie freundlich an, Merkur nicht widerwärtig“ — am 28. August 1749 mittags mit dem Glockenschlage zwölf in diese Welt eintrat. Und als wollte er sich dankbar erweisen bei der alten Sternenlehre, die ihm die Herrschaft über die Geister und die Herzen wie sein Naturrecht zusprach, hat Goethe seinen Faust das Zeichen des Makrokosmos noch einmal als Offenbarung empfinden lassen — „war es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?“ —, in den ‚Orphischen Urworten‘ die Heimarmene, das allwaltende Schicksal, unter dem Bilde der Astrologie gestaltet, und in dem Werk

seines Alters, den Wanderjahren, seine Makarie sich im Kosmos als integrierenden Teil bewegen und ihr die Verhältnisse unseres Sonnensystems eingeboren sein lassen, wie seine eigenen verfeinerten Sinne einst das ferne Erdbeben verspürt hatten. So tönt auch im Gesange der Erzengel im Faust noch einmal die Sonne nach alter Weise in Brudersphären Wettgesang. Ein Abschiedsgruß der erhabenen Schönheit dieses alten Weltbildes, wie sie am reinsten bei den Pythagoreern und bei Platon, bei beiden ohne Vermengung mit den herabziehenden Einzelheiten der Sterndeutung, zutage tritt. Und vielleicht doch nicht bloß ein Abschiedsgruß. Der Forscher wird den Weg nie mehr zurückfinden zu jenen Zeiten, denen „das Buch der Nacht weit aufgeschlagen war"; er wird anderen Rätseln nachspüren in den unendlichen schweigenden Weiten dessen, was jetzt die Welt heißt. Aber wenn er unbeirrt durch geheiligte Überlieferung und die Dichterträume einer noch nicht fernen Vergangenheit einheitliche Weltgesetze ergründet, so sucht er auch in dieser unendlichen Welt zuletzt wie Pythagoras von Samos die Wohlordnung, den Kosmos.

Literatur.

Der Versuch einer kritischen Darstellung der Geschichte des astronomischen Weltbildes ist noch kaum gemacht; er setzt eine kritische Geschichte der Astronomie voraus, die es weder für das Altertum noch für das Mittelalter gibt. Sehr anregend ist das gedankenreiche und glänzend geschriebene, nur manchmal etwas zu stark konstruierende kleine Buch von TROELS-LUND, Himmelsbild und Weltanschauung im Wandel der Zeiten, deutsch von Bloch (3. Aufl. 1907). Die belehrende knappe Darstellung von S. OPPENHEIM, Das astronomische Weltbild im Wandel der Zeit (1906), die allerdings die Anfänge im primitiven Denken kaum behandelt, ist weit ergiebiger und korrekter als das Buch von SVANTE ARRHENIUS, Die Vorstellung vom Weltgebäude im Wandel der Zeiten (übers. von Bamberger, 1908). In dem ausgezeichneten, in Deutschland leider kaum beachteten Buche von J. L. E. DREYER, History of the Planetary System from Thales to Kepler (1906), das durchweg auf eigener kritischer Forschung beruht, ist die Beschränkung des Stoffes durch den Titel zutreffend gekennzeichnet.

Dem Wunsche des Herausgebers des Bandes folgend habe ich nachstehend auch die Einzelliteratur etwas ausführlicher verzeichnet.

S. 1 ff. Für die primitiven astronomischen Anschauungen kommen namentlich die z. T. von W. WUNDT, Die Anfänge der Philosophie, in Teil I Abt. V S. 29 ff. genannten Darstellungen der Psychologie und Weltanschauung der Naturvölker in Betracht, von denen hier besonders E. B. TYLOR, Die Anfänge der Kultur, deutsch von Spengel und Poske, 2 Bde. (1873), WAITZ-GERLAND, Anthropologie der Naturvölker, 6 Bde. (1859—1873), auch Material aus J. G. MÜLLER, Geschichte der Amerikanischen Urreligionen (1855) herangezogen wurden. Ganz besonders aufschlußreich ist KARL VON DEN STEINEN, Unter den Naturvölkern Zentralbrasiliens (1894). Der Fortführung der Arbeit von A. KÖTZ, Über die astronomischen Kenntnisse der Naturvölker Australiens und der Südsee (1911) darf mit großem Interesse entgegengesehen werden. Auch die nützliche Zusammenstellung neuerer Mitteilungen in dem Vortrag von FERD. Frh. v. ANDRIAN, Die kosmologischen und kosmogonischen Vorstellungen primitiver Völker, Korrespondenzblatt der deutschen anthropol. Gesellsch. (1897), n. 10 wurde herangezogen. — Für die tägliche oder monatliche Erneuerung der Himmelskörper (S. 1 f.) vgl. auch H. USENER, Götternamen (1896), S. 288 ff.

S. 2 f. Über die Vorstellungen vom Himmelszelt und viel Verwandtes s. das stoffreiche und anregende, freilich auch allerlei Irrwege betretende und in den Einzelheiten nicht immer zuverlässige Buch von ROBERT EISLER, Weltenmantel und Himmelszelt, 2 Bde. (1910). Vorher hat schon MARIE GOTHEIN, Der Gottheit lebendiges Kleid im Arch. f. Religionswiss. Bd. IX (1906) S. 337 ff. verwandte Vorstellungen erörtert. — Die Kindheitserinnerung S. 2 erzählt ERNST MACH, Erkenntnis und Irrtum, 2. Aufl. (1906) S. 102, s. Eisler S. 487. — Die auf derselben Seite angeführte Lucrezstelle steht im V. Buch v. 662 ff.

S. 4. Für die Bedrängnis von Sonne und Mond bei den Finsternissen s. R. LASCH, Arch. f. Religionswiss. III (1900) S. 97 ff. und meine Zusammenstellungen in PAULY-WISSOWA, Realenzyklopädie der klass. Altertumswiss. Bd. VI 2331 ff.

S. 5. Zur Religion der Mutter Erde vgl. U. v. WILAMOWITZ, Einleitung zu seiner Übersetzung von Aischylos' Eumeniden (Griech. Tragödien II, 3. Aufl. 1901); A. DIETERICH, Mutter Erde (1905). Das Doppelgesicht chthonischer Religion tritt in dem leidenschaftlichen (zu-

gleich heraklitisch gefärbten) Ausbruch in Goethes Werther (Brief vom 18. August) hervor, aus dem S. 5 eine Zeile angeführt ist. — Über den indogermanischen Himmelsgott und seinen Namen s. P. KRETSCHMER, Einleitung in die griechische Sprache (1896) S. 78ff. und O. SCHRADER, Reallexikon der indogerman. Altertumskunde (1901) S. 670ff.

S. 6f. Über die Wintersonnenwende und das Julfest bei den Germanen A. TILLE, Yule and Christmas (1899) und G. BILFINGER, Untersuchungen über die Zeitrechnung der alten Germanen II (1901). Sonnenräder: U. JAHN, Die deutschen Opferbräuche (1884); FR. VOGT, Zeitschr. des Vereins für Volkskunde III (1893) S. 349ff.

S. 8f. Die zitierte Stelle aus Goethe s. Gespräche mit Eckermann, III. Teil, letztes Gespräch, am 11. März 1832. — Über die Priorität des Mondkultus und die Entwicklung der Sonnenreligion F. CUMONT, La théologie solaire du paganisme Romain, Mém. prés. par div. sav. à l'Acad. des Inscr. et Belles-lettres, tom. XII, 2e partie, Paris 1909. — Mondaberglaube: W. H. ROSCHER, Über Selene und Verwandtes (1890).

S. 10f. Der ägyptische Sonnenkult ist im Anschluß an A. ERMAN, Die ägyptische Religion (1909) geschildert, von wo (S. 67ff.) auch die Übersetzung des Sonnenhymnus entnommen ist. Stark eingeschränkt wird die Bedeutung des Sonnenkultus in Ägypten — abgesehen von der Zeit Amenophis' IV. — von A. WIEDEMANN, Arch. f. Religionswiss. XIII (1910) 351. Für die ägyptische Himmelskunde ist fundamental, jetzt freilich verbesserungsbedürftig H. BRUGSCH, Thesaurus inscript. Aegyptiac. I (1883).

S. 11ff. Über die Orientation, die im ganzen wie im einzelnen noch gar sehr der weiteren Untersuchung bedarf, handelt vor allem H. NISSEN, Orientation, Studien zur Geschichte der Religion, 3 Hefte (1906—1910). Über das Buch des Astronomen Sir J. NORMAN LOCKYER, The Dawn of Astronomy (1894), das die ägyptischen Tempel behandelt, und über die Forschungen von F. G. PENROSE über die Orientation der griechischen Tempel, Philosophical Transactions of the Royal Society of London vol. 184 (1893) p. 805ff., 190 (1897) p. 43ff. vgl. NISSEN S. 10. — Im übrigen mögen auch USENERS Götternamen an verschiedenen Stellen (bes. S. 190ff.) und für die Orientation der christlichen Kirchen besonders J. SAUER, Symbolik des Kirchengebäudes (1902) S. 87ff. eingesehen werden, aus der S. 14 auch der Hinweis auf Dante entnommen ist. — Die im Text S. 13 berührten seltsamen Folgerungen aus den Maßen der Cheopspyramide, die Taylor und Smith gezogen haben, kenne ich aus dem Bericht von O. NAIRZ, Prometheus (1906), n. 852.

S. 14f. Über Stonehenge sind zuletzt zu vergleichen der Vortrag von W. PASTOR in der Prähistorischen Fachsitzung der Berl. Ges. für Anthropol., Ethnol. und Urgeschichte, nebst der Diskussion, abgedruckt in der Zeitschr. für Ethnologie 43 (1911) S. 163ff. und im Gegensatz dazu die Abhandlung von C. SCHUCHHARDT in der Prähistorischen Zeitschrift Bd. II (1910) S. 293ff., der ich gefolgt bin.

S. 15. Zum Planetenkult ist außer der unten zu nennenden Literatur über die babylonische Astronomie auch der Artikel über Planeten von W. H. ROSCHER in seinem Mytholog. Lexikon zu nennen, ferner das Buch von D. CHWOLSOHN, Die Ssabier und der Ssabismus (1855).

S. 17. Die Göttlichkeit der Gestirne bei den Griechen ist kurz von J. BERNAYS in seiner nachgelassenen Abhandlung Über die unter Philons Werken stehende Schrift über die Unzerstörbarkeit des Weltalls, Abhandl. d. Berl. Akad. (1882), S. 44ff. besprochen; im Hinblick auf den Kultus völlig richtig, aber der Einfluß der Philosophie auf die volkstümliche Anschauung ist von ihm wohl überschätzt. — Über den frühchristlichen und mittelalterlichen Glauben an Dämonen oder Engel als Leiter der Sterne und deren Beseelung handelt mit reichen Belegen F. PIPER, Mythologie und Symbolik der christlichen Kunst I 2, S. 199ff. (auch für die Sphärenharmonie von Belang). — Die Stelle aus Dante im Paradiso II 127ff.

S. 18. Über das Jenseits am Himmel und die Himmelsreise der Seele muß zunächst auf E. ROHDE, Psyche, 4. Aufl. (1910), W. BOUSSET, Die Himmelsreise der Seele, im Archiv f. Religionswiss. IV (1901) S. 160ff., auch auf A. DIETERICH, Mithrasliturgie, 2. Aufl. (1910) S. 181, sowie auf F. CUMONTs auch sonst für uns sehr wertvolles Buch Les religions orientales dans le paganisme Romain (2. éd., 1909, auch deutsch bearbeitet von Gehrich,

1910) p. 186ff. und die dazu gehörigen Anmerkungen hingewiesen werden. Cumont betont nach Boussets Vorgang stark den östlichen Ursprung der Anschauung vom Aufstieg der Seelen zu den göttlichen Gestirnen. Gewiß ist der außerordentliche Aufschwung dieses Glaubens bei Griechen und Römern in der hellenistischen und Kaiserzeit auch auf den starken semitischen Einfluß zurückzuführen; aber die Vorstellung ist viel weiter, fast überall, verbreitet, und die Empfänglichkeit der Griechen und Römer für die Lehre hat, wie Platon allein schon zeigen kann, nicht erst in hellenistischer Zeit erweckt werden müssen. — Zu vergleichen ist auch die Arbeit von C. HÖNN, Himmelfahrt im Altertum (Mannheim 1910).

S. 19. Die hier zum Teil angeführte Gedichtskizze von G. Keller vollständig in J. BÄCHTOLD, Gottfried Kellers Leben III 627.

S. 20ff. Zur Geschichte der Sternbilder ist der Versuch des Citoyen DUPUIS, in seiner Origine de tous les cultes tom. VI 2 (l'an III de la Républ.) eine Übersicht über die Sternbildernamen zu geben, schon wegen der Kritiklosigkeit des Verfassers nicht mehr zu gebrauchen. Ausgezeichnet ist das Buch von L. IDELER, Untersuchungen über den Ursprung und die Bedeutung der Sternnamen (1809). Außer den unten zu erwähnenden Arbeiten zur babylonischen Astronomie sind G. THIELE, Antike Himmelsbilder (1898) und F. BOLL, Sphaera (1902) zu nennen. Die Geschichte der Sternbilder im vollen Umfang ist noch zu schreiben.

S. 23f. Über Sonnenmythen handelt das anregende Werk von L. FROBENIUS, Das Zeitalter des Sonnengottes, I. Bd. (1904), dessen Grundgedanken ich freilich nicht zustimmen könnte.

S. 25ff. Für die Erforschung der babylonischen Astronomie wurden grundlegend das Werk von P. JENSEN, Kosmologie der Babylonier (1890), sowie die Arbeiten der Jesuiten J. EPPING und J. N. STRASSMAIER (1889); jetzt hat als ihr Nachfolger F. X. KUGLER mit glänzendem Scharfsinn weitere Tafeln gedeutet und in einem großen Werke Sternkunde und Sterndienst in Babel (bis jetzt Bd. I und II 1, 1907—9) für alle weitere Arbeit das Feld bestellt. Außer Arbeiten von F. HOMMEL kommt noch besonders das wertvolle Buch von M. JASTROW, Die Religion Babyloniens und Assyriens (seit 1905 im Erscheinen, mit zahlreichen Textwiedergaben) in Betracht. Einen vortrefflichen kritischen Überblick über die Astronomie, Himmelsschau und Astrallehre bei den Babyloniern gibt C. BEZOLD in einem Vortrage (Sitzgsber. d. Heidelb. Akad., 1911, 2. Abh.), dem ich hier vielfach gefolgt bin. — Über den ostasiatischen Tierzyklus, dessen babylonischen Ursprung schon Scaliger vermutet hat, und die Dodekaoros vgl. außer Abhandlungen von L. IDELER und dem XII. Kapitel meiner Sphaera besonders E. CHAVANNES, Le cycle turc des douze animaux (T'oung-pao, Série II, vol. VII, n. 1, 1906), auch WM. J. HINKE, A new boundary stone of Nebukadnezzar I (1907); ich hoffe die Frage in einiger Zeit wieder aufnehmen zu können. — Für die indische Astronomie ist die hervorragende Darstellung von G. THIBAUT, Grundriß der indo-arischen Philologie III. Bd. 9. Heft (1899) zu vergleichen; für die chinesische, außer älteren Arbeiten von L. IDELER, J. B. BIOT, Études sur l'astronomie Indienne et sur l'astronomie Chinoise (1862) und G. SCHLEGEL, Uranographie Chinoise (1875), mit freilich phantastischen Theorien. — Die Astronomie im Alten Testament hat G. V. SCHIAPARELLI behandelt (L'astronomia nell'Antico Testamento, 1903, deutsch von Lüdtke 1904). — Zur Beobachtung des Himmelsäquators in alter Zeit vgl. BOLL, Sphaera S. 315 nach einem Hinweis von IDELER.

S. 27. Gegen die von H. WINCKLER im Anschluß an E. STUCKENs Astralmythen (1896—1907, 5 Teile) vorgetragene Theorie einer altorientalischen Weltanschauung (am zusammenhängendsten in seiner Schrift Himmels- und Weltenbild der Babylonier als Grundlage der Weltanschauung und Mythologie aller Völker, 2. Aufl. 1903) und die Schriften seines Jüngers A. JEREMIAS (hier ist besonders seine Streitschrift Das Alter der babylon. Astronomie, 2. Aufl., 1909, zu nennen) ist F. X. KUGLER, Im Bannkreis Babels (1910) und die vorhin genannte Abhandlung von C. BEZOLD zu vergleichen.

S. 29. Über den Astronomen Kidinnu = Kidenas s. F. CUMONT, Babylon und die griech. Astronomie (Neue Jahrbücher f. d. kl. Altert. Bd. 27 [1911] S. 1ff.).

S. 29ff. Eine vollständige wissenschaftliche Geschichte der griechischen Astronomie ist noch nicht geschrieben, so große Vorarbeiten dafür vorliegen. Um die kritische Herausgabe der Quellen haben J. L. HEIBERG, dann K. MANITIUS und E. MAASS besondere Verdienste;

von großem Werte ist auch H. DIELS' Ausgabe der Vorsokratiker, 2 Bde. (1906—1910). Eine von K. MANITIUS bearbeitete, im Druck befindliche deutsche Übersetzung des Almagest auf Grund der kritischen Textbearbeitung von J. L. HEIBERG wird den Astronomen willkommen sein. Nach den älteren Arbeiten von SCHAUBACH, DELAMBRE, IDELER, LETRONNE, BOECKH, TH. H. MARTIN ist ganz besonders P. TANNERY hier tätig gewesen; seine zwei Hauptwerke auf diesem Gebiete sind Pour l'histoire de la science hellène (1887) und — noch wichtiger — Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne (1893). Natürlich sind auch die großen Werke über die Geschichte der Mathematik wie die von M. CANTOR und G. LORIA von Bedeutung; eine kurze Darstellung mit Belegen gibt E. HOPPE, Mathematik und Astronomie im klass. Altertum (1911). Die Historiker der Geschichte der griechischen Philosophie, wie bes. E. ZELLER, bringen auch das Material zur Geschichte der Astronomie; in lebendige Beziehung zur Gesamtgeschichte der Wissenschaften hat es vor allem TH. GOMPERZ in seinen Griechischen Denkern, 3. Aufl. (1911) gebracht. — Einen kurzen, sachkundigen Überblick über die Geschichte der griechischen Astronomie gibt F. HULTSCH in Pauly-Wissowas Realenzyklopädie; vgl. ebenda meine Artikel über Finsternisse und Fixsterne und den von W. GUNDEL über die Milchstraße (unter dem Worte Galaxias).

S. 30f. Die Geschichte der Geographie der Erdkugel hat besonders H. BERGER, Gesch. der wissensch. Erdkunde bei den Griechen, 2. Aufl. (1903) gechrieben.

S. 32f. Über die Geschichte der Präzession ist eine ausgezeichnete Untersuchung von TH. H. MARTIN, Mém. prés. par divers savants à l'Acad. des Inscr. I. Série, tom. VIII p. 303—522 hervorzuheben.

S. 34ff. Zur Geschichte des heliozentrischen Systems ist grundlegend G. V. SCHIAPARELLIs Abhandlung, Die Vorläufer des Copernikus im Altertum (deutsch von CURTZE, 1876), sowie eine neuere Abhandlung desselben Verfassers in der Zeitschrift Atene e Roma I (1898). — Über die (anscheinend noch nicht ganz gesicherte) Erkenntnis der wechselnden Lichtstärke des Planeten Mars durch die Babylonier s. SCHIAPARELLI in der Zeitschrift Das Weltall IX (1908) 1ff. — Die antiken Belege für die Attraktionskraft der Sonne hat zum erstenmal F. CUMONT in der zu S. 8f. genannten Abhandlung (p. 453f.) gesammelt und gewürdigt.

S. 36. Über Stratons, des Lehrers des Aristarch, Beziehungen zum Atomismus s. H. DIELS, Ber. der Berl. Akad. 1893.

S. 37. Die Lucrezstelle steht Buch II 1044ff.

S. 37f. Die astronomischen Instrumente der Griechen hat aus den Quellen K. MANITIUS in der Zeitschrift Das Weltall, 6. Jahrg. (1906) beschrieben; von demselben sind dort auch weitere Abhandlungen zur Geschichte der Astronomie in den Bänden 5 und 7 zu finden. — Über die römische Kalenderuhr von Salzburg s. A. REHM, Jahreshefte des Österr. Archäol. Instituts 6 (1903); über die Trümmer des astronomischen Instrumentes, das bei Antikythera im Meeresgrund gefunden wurde, denselben in der Berl. Philol. Wochenschr. 27 (1907) 470. Ein öffentliches Parapegma (d. h. Steckkalender, zum Einstecken eines Stiftes mit dem Monatsdatum neben die astronomischen Angaben mit Löchern versehen) s. H. DIELS und A. REHM, Ber. d. Berl. Akad. 1903.

S. 41ff. Die seit SCALIGERS und SALMASIUS' großen Leistungen vernachlässigte Geschichte der Astrologie ist neuerdings wieder aufgenommen worden; außer den babylonischen Quellen (s. die oben zu S. 25ff. zitierte Literatur) sind besonders die griechischen Texte, die im Catalogus codicum astrologorum Graecorum (bisher 10 Bde., 1898ff.) publiziert werden, von Wichtigkeit. Das große Werk von A. BOUCHÉ-LECLERCQ, L'astrologie grecque (1899) ist zwar noch ohne Kenntnis der Fülle neuer Texte geschrieben, aber dennoch nicht nur durch die erschöpfende Zusammenstellung eines gewaltigen Materials, sondern auch durch die unbeirrbare Klarheit und Schärfe des Blicks von bleibendem Werte. Über die Ergebnisse der neueren Quellenuntersuchungen habe ich in den Neuen Jahrbüchern f. das klass. Altertum XXI (1908) einen Überblick gegeben; W. KROLL, der auch den Astrologen Vettius Valens zum erstenmal herausgegeben hat (1909), hat in der genannten Zeitschrift VII (1901) einige lehrreiche Proben des astrologischen Systems mitgeteilt. Übersetzung babylonischer astrologischer Texte durch die Griechen ist von C. BEZOLD und F. BOLL, Sitzungsber. d. Heidelb. Akad. 1911,

Abh. 7 nachgewiesen. Für den Zusammenhang der Religion mit der Astrologie ist besonders wichtig F. CUMONT im VII. Kapitel seines obengenannten Buches über die oriental. Religionen im röm. Reich; vgl. auch sein großes Werk Textes et Monuments rel. aux myst. de Mithra, 2 Bde. (1896—99). Für die Stellung der Astrologie in der älteren christlichen Zeit ist E. SCHÜRER, Die siebentägige Woche im Gebrauche der christl. Kirche der ersten Jahrhunderte, Zeitschr. f. die neutestam. Wissenschaft VI (1905), und für das spätere Mittelalter der glänzende Aufsatz von F. v. BEZOLD, Deutsche Zeitschrift für Geschichtswissenschaft Bd. VIII (1892) zu vergleichen. Über Kometenaberglauben und ähnliches vgl. außer dem noch immer wertvollen Buch von PINGRÉ, Cométographie (1783 f.) H. LUDENDORFF, Die Kometenflugschriften des XVI. und XVII. Jahrhunderts (Zeitschr. f. Bücherfreunde XII 2, 1908/9), W. GUNDEL, Hess. Blätter für Volkskunde VII (1908) und W. HESS, Himmels- und Naturerscheinungen in Einblattdrucken des XV.—XVIII. Jahrhunderts (Zeitschr. f. Bücherfreunde 1910 und 1911, auch als Buch erschienen). — Die im Texte S. 45 zitierten Verse RONSARDS sind mir nur aus STENDHALS Roman „Die Karthause von Parma" bekannt, dessen Held Fabrizzio oben S. 50 erwähnt ist. — Die Äußerung LICHTENBERGS, die S. 46 angeführt ist, steht in seinen Vermischten Schriften I 26. — Die Planetenwoche (vgl. S. 50) ist aller Wahrscheinlichkeit nach erst von der ägyptisch-griechischen Astrologie der Ptolemäerzeit geschaffen; vgl. u. a. E. MAASS, Tagesgötter (1902) und meinen Artikel Hebdomas in Pauly-Wissowas Realenzyklopädie Bd. VII.

Im Augenblick, wo ich die Korrektur abschließe (Anfang März 1912), ist das kleine, aber äußerst wertvolle Buch von J. L. HEIBERG, Naturwissenschaften und Mathematik im klassischen Altertum (1912) erschienen, das ich mich besonders freue zum Schluß noch nennen zu können.

DIE ZEITRECHNUNG.

Von

F. K. Ginzel.

I. Die Entwicklung des Zeitsinns. Einer der Faktoren, die an dem Aufbau unserer jetzigen Kultur hervorragenden Anteil haben, ist der Zeitsinn, nämlich die Fähigkeit, für die Bestimmung der Zeit, sowohl der täglichen wie der jährlichen, Interesse zu haben. Der Zeitsinn war auf den niederen Kulturstufen der Völker nur in rohen Spuren vorhanden und hat sich erst im Laufe von Jahrhunderten, mit der steigenden Kultur selbst, allmählich entwickelt. Heutzutage sind Uhren und Kalender, die Ausdrucksmittel des Zeitsinns, bis in die entlegensten Teile der Erde verbreitet, wo noch irgendwelche Zivilisation vorhanden ist. Die Uhr ermöglicht die sichere Messung der Teile des Tagkreises, und an den Präzisionsuhren der Sternwarten kann man sich davon überzeugen, welche Vollkommenheit diese Instrumente in der Bestimmung der kleinsten Zeitteile erreicht haben. Auf die Uhr ist unsere ganze tägliche Arbeit, die Stunde der Ruhe, die Minute der Reise gestellt. Ganze Länder werden jetzt von Zentralstellen aus mit den von den Sternwarten gelieferten Zeitsignalen versehen, so daß es jetzt z. B. möglich ist, von einem bis zum andern Ende des Deutschen Reiches alle guten Uhren bis auf wenige Sekunden in Übereinstimmung zu erhalten. Nicht mindere Sicherheit wie die Uhr betreffs der täglichen Zeit, bieten die Kalender bezüglich der jährlichen Zeit. Die im heutigen gregorianischen Kalender enthaltenen Daten, der Tag, die Woche, der Monat, das Jahr, stehen jahraus, jahrein, und zwar noch für viele Jahrtausende, in guter Übereinstimmung mit dem scheinbaren Sonnenumlaufe und bilden die Richtschnur im Leben des einzelnen wie der Gesamtheit. An den Kalender sind eine Unzahl Gegenstände des Rechts und der Volkswirtschaft, alle Tätigkeit des Landmanns, des Kaufmanns, des Gewerbtreibenden und des Industriellen geknüpft. Der Zeitsinn.

So besitzen also die modernen zivilisierten Völker einen vollständig ausgebildeten Zeitsinn, indem sie die Zeit nach einem festen, wohlbegründeten Systeme messen und verwenden. Das war nicht immer so. Es gab Zeitalter, in denen selbst bedeutende Nationen sich mit einer nur rohen Tagesteilung begnügten, in Beziehung auf den Kalender sich in steter Nichtübereinstimmung mit dem Himmel befanden und erst nach einer Kurzer historischer Überblick.

Kette von vielen Versuchen eine erträgliche Jahrrechnung zustande brachten. Diese Tatsache zu verstehen, fällt uns schwer, da wir unter ganz anderen Kulturverhältnissen aufwachsen. Es mutet uns sonderbar an, zu erfahren, daß z. B. die Griechen zur Zeit ihrer höchsten Kultur, im Zeitalter des Perikles und Aristophanes, die Tageszeit nur ungefähr durch das Stoicheion bestimmten, d. h. durch die Länge des Schattens, den der aufrechtstehende Mensch wirft. Die höchst unvollkommenen Wasseruhren bilden den Anfang zu einer Stundenabmessung, wurden aber erst im alexandrinischen Zeitalter durch die etwas besseren Sonnenuhren ersetzt. Auch die Römer gelangten erst im 3. Jahrhundert v. Chr. zur Einführung der Sonnenuhr. Ebenso langsam vollzog sich bei den Römern und Griechen die Entwicklung des Jahres. Bei den letzteren war diese Entwicklung wenigstens eine kontinuierliche, indem es ihnen nach und nach gelang, durch allmählich verbesserte Schaltsysteme ihr Mond-Sonnenjahr so weit mit dem jährlichen Sonnenlaufe in Übereinstimmung zu bringen, daß die Abweichungen nicht zu bedeutend wurden. Die Römer dagegen operierten von vornherein, seit König Numas Zeiten, mit einem falschen Schaltsystem, und ihre Zeitrechnung befand sich bis zum 3. Jahrhundert v. Chr. in Verwirrung. Um diese Zeit war die Astronomie in der alten Welt, wenigstens aber in Griechenland, so weit entwickelt, daß man mit ihrer Hilfe genauere Schaltungsprinzipien für das Mond-Sonnenjahr hätte aufstellen oder zum Sonnenjahr hätte übergehen können. Daß dies aber nicht geschehen ist, hat seinen Grund nicht nur in dem zähen Festhalten an den althergebrachten Systemen, sondern auch in der damaligen geringen Entwicklung des Zeitsinns. Endlich, wie es scheint seit Eudoxos, verbreitete sich in der antiken Welt die näherungsweise zutreffende Annahme, daß das Sonnenjahr um einen Vierteltag größer sei als 365 Tage, also $365\frac{1}{4}$ Tage enthalte. Diese Kenntnis wurde praktisch aber erst verwendet, als die römische Republik gestürzt war und dem Kaiserreich Platz gemacht hatte. Im Jahre 46 v. Chr. ordnete Julius Cäsar an, daß fernerhin das Jahr zu 365 Tagen gerechnet und alle vier Jahre ein Tag eingeschaltet werden solle. Damit war das alte Mond-Sonnenjahr verworfen und ein leicht regulierbares Sonnenjahr an dessen Stelle gesetzt. Daß Hipparch ‚schon früher einen erheblich genaueren Betrag der Länge des Sonnenjahrs ermittelt hatte, wurde von denen, welche zu jener Reform rieten, nicht beachtet oder ist ihnen nicht bekannt geworden. Das julianische Jahr (so benannt nach Julius Cäsar) fand nur langsam Verbreitung. Der Fall des alten Mond-Sonnenjahrs erfolgte im oströmischen Reiche erst, als das Christentum als Staatsreligion anerkannt war und mit diesem die letzten Spuren des Götterglaubens und der antiken Philosophie verschwanden. Durch 1600 Jahre behielt das julianische Jahr seine Geltung. Der Fehler, welcher seiner Länge zugrunde lag, wurde erst verbessert, als die Abirrung des julianischen Jahrs von dem wirklichen Sonnenjahr aller Welt offenkundig geworden war, abermals ein Beweis für die nur langsam fort-

schreitende Entwicklung des Zeitsinns. Und selbst in unseren Tagen, wo wir schon daran denken, das von jenem Fehler befreite gregorianische Sonnenjahr weiter zu verbessern, rechnet noch ein Teil der europäischen Kulturnationen (Russen, Bulgaren, Serben, Rumänen, Griechen) nach dem alten julianischen Jahre, obwohl damit ihre Datierungen schon um 13 Tage zu spät fallen. — Die allmähliche Entwicklung des Zeitsinns als Kulturfaktor wird uns noch verständlicher, wenn wir die Ursachen betrachten, welche das Zeitrechnungswesen begründeten, und wenn wir uns außerdem die tiefsten Stufen der Zeitrechnung bei den sogenannten Naturvölkern vorführen.

II. Die Ursachen der Entstehung einer Zeitrechnung. Der Ausgangspunkt zum Anstreben einer geordneten Zeitrechnung liegt schon in den ersten Schritten zur Zivilisation. Bei den nomadischen Völkern, welche, ihren Erwerb in der Jagd und der Fischerei suchend, von einem Orte zum andern umherziehen, sind kaum mehr als die Spuren einer Zeitteilung zu bemerken. Sie kennen noch kein Jahr im Sinne eines fest begrenzten Zeitraums, sondern benennen nur die verschiedenen Zeiten des Jahrs nach Pflanzen und Tieren, die ihnen in diesen Zeiten zur Nahrung dienen: diese Jahresabschnitte, je nach der geographischen Lage des Landes und der Fruchtbarkeit in der Zahl verschieden, besitzen sehr ungleiche Länge und sind mit „Monaten“ nur ganz entfernt vergleichbar. Ein roher Begriff vom Jahre, den man am besten als „Naturjahr“ bezeichnet, stellt sich ein, wenn die Völker zur Seßhaftigkeit, zum Ackerbau und zur Viehzucht übergehen. Die Bebauung der Felder, die Einbringung der Ernte, die Vorbereitung der Werkzeuge und Geräte zur Aussaat nötigen dann den Menschen, über Mittel und Wege nachzudenken, um jene Zeiten im voraus wenigstens ungefähr erkennen zu lernen. Man achtet nun mehr auf die Sonne, benennt die Jahreszeiten und versucht dieselben, indem man dem Emporsteigen gewisser Sternbilder am Nachthimmel der gleichen Jahreszeiten folgt, nach dem Wiedererscheinen dieser Sterne anzugeben.

Anlaß zur Entstehung der Zeitrechnung gaben: 1. Die Bedürfnisse von Ackerbau und Viehzucht.

Hierzu kommt noch ein anderer Grund, der meist unterschätzt wird, der aber von treibender Wirkung auf die Entstehung aller Zeitrechnung gewesen ist: die Religion. So unbestimmt die religiösen Begriffe in den Anfängen und so verschieden sie in ihrer späteren Entwicklung sind, finden wir in ihnen vielfach den gemeinsamen Zug, den Göttern oder den Wesen, denen der Mensch die Beherrschung über die Natur zuschrieb, den Dank auszudrücken für eine reiche Ernte oder die Bitte zu unterbreiten für gesegnete Fluren.[1]) Die Ausdrucksmittel für diesen Dank und diese Bitte waren die Feste und Opfer. Naturgemäß mußten Feste und Opfer so gehalten werden, daß sie mit der Bedeutung der betreffenden Gottheiten übereinkamen; es mußte also auch die Jahreszeit so gewählt werden, daß die entsprechenden Gaben oder Opfer dargebracht werden

2. Religiöse Feste.

1) Ausführlicheres hierüber siehe im I. Abschnitt.

Griechen. konnten. Die griechischen Feste der Oschophorien und Dionysien erforderten die reife Traube als Opfer, konnten also erst im Spätherbst (Oktober bzw. Römer. Dezember) gefeiert werden. Ähnlich die römischen Vinalia, zwei Weinfeste, von denen eins in das Frühjahr fallen mußte, weil mit dem Ausschank des vorjährigen, ausgegorenen Weins begonnen werden sollte, und das andere in den Herbst, da man mit diesem die Erstlinge des frühreifen Weins dem Juden. Jupiter zu opfern hatte. Die ältesten Feste der Juden reichen weit vor Moses zurück, sind wahrscheinlich schon aus Kanaan übernommen und rein agrarischen Charakters: das Massoth (aus welchem sich das Osterfest entwickelt hat), ein Frühlingsopferfest, an welchem Jehova die Erstlingsgarben der Frühjahrsgerste geopfert wurden, das Wochenfest beim Schluß der Frühjahrsernte, und das Hüttenfest im Herbste, als Dank für die Obst- und Fruchternte und Weinlese am Schlusse des Ackerbaujahres.

Von Ägypten durch ganz Asien hindurch finden wir noch die Reste solcher an bestimmte Jahreszeiten gebundenen Feste und Opfer verbreitet. Ägypter. Bei den Ägyptern des alten Reichs war eines der Hauptfeste die Zeit, um welche „der Stern der Isis", d. h. Sirius, nachdem er eine Zeitlang unsichtbar gewesen, am Morgenhimmel wieder hervortrat, denn damit war die beginnende Nilüberschwemmung, das wichtigste Ereignis für die ackerbautreibende Bevölkerung, angekündigt. Darum ist Sirius personifiziert durch die Göttin Sothis, „die Regentin des Jahranfangs", welche die Überschwemmung bringt und durch diese den Kreislauf der Natur beginnen läßt. Das Fest konnte in der alten Periode nur in die Nähe der Sommersonnenwende fallen, da der heliakische Aufgang (vgl. S. 65) des Sirius und der Anfang der Nilschwelle mit der Zeit des Solstiz ungefähr zusammentrafen.

Parsen. In den Gebeten der Parsen (zoroastrische Zeit) kommen Anrufungen von sechs mehrtägigen Festen vor, die unter dem Namen der Gahanbâr bekannt sind. Diese Gahanbâr waren Dankfeste bzw. Bittage beim Wechsel der Jahresabschnitte, wie die Namen derselben beweisen; jedes Gahanbâr mußte an entsprechender Stelle des Jahres mit den dazu passenden Opfern begangen werden.

Chinesen. Die beiden jährlichen Hauptopfer der Chinesen werden zur Zeit des Wintersolstiz und beim Sommeranfange als Staatsfeste vom Kaiser selbst Japaner. dargebracht.[1]) Desgleichen knüpften sich bei den Japanern (im Mond-Sonnenjahre vor der Annahme des gregorianischen Kalenders) einzelne go-sekku (öffentliche Feste) an bestimmte Jahrpunkte; so das „Fest der sieben Kräuter" an den beginnenden Frühling, die Bittage um gesegnete Ernte (tochi-goi-no-matsuri) an den zweiten Monat, das Zeremoniell der Verehrung der Ahnen an den Tag des Herbstäquinoktiums usw.

Die Völker, welche Feste dieser Art also immer in der entsprechenden Jahreszeit feiern wollten, kamen durch das Begehen der Feste selbst schon früh zu dem ungefähren Begriff des Jahres, das allerdings noch ein

1) Vgl. auch den Band dieses Werkes: Die orientalischen Religionen S. 165—170.

bloßes Naturjahr war und mit dem astronomischen nur ungefähr zusammenfiel. Wir werden später die Mittel kennen lernen, durch welche sie das anfänglich sehr starke zeitliche Schwanken der Feste mehr oder weniger vollständig zu beseitigen.

3. Monddienst.

Die Religion hat aber in noch anderer Weise die Ausbildung der Zeitrechnung beeinflußt. Die Sternverehrung gehört zu den sehr frühen Formen des Götterdienstes bei den Völkern. Daß sich insbesondere die Verehrung einzelner, Licht und Wärme spendender Himmelskörper zu einem System gestalten konnte, sehen wir an der Astralreligion der Babylonier. Die Ausstattung dieser Astralgötter mit Macht, der Glaube an ihre Herrschaft über die Natur und das ganze Menschengeschlecht, die Verfolgung ihres geheimnisvollen Tuns am Himmel, d. h. die Beobachtung des scheinbaren Laufes der Planeten und ihrer Stellungen zueinander, führte zur Astrologie, und von dieser, wie wiederum bei den Babyloniern deutlich aus dem uns erhalten gebliebenen Inschriftenmaterial ersichtlich ist, allmählich zur Astronomie. Vornehmlich der Mond und die Sonne genossen auf dieser Stufe der Religionsanschauung große Verehrung. In Vorderasien, Arabien überwog aber der Monddienst den Sonnendienst, für die sehr alte Zeit sind in diesen Ländern sogar Anzeichen einer allgemeinen Mondreligion vorhanden. Die Feier der Mondfeste, die natürlich an das Wiedererscheinen des Mondgottes, an die regelmäßig sich erneuernden Lichtgestalten der Mondscheibe, seien es die Vollmonde oder die erste Sichel, geknüpft war, hatte auch eine Konsequenz für die Zeitrechnung: das Volk gewöhnte sich, die Tage nach dem Monde bzw. nach seinen Phasen zu zählen. Damit war der Mondmonat und das Mondjahr geschaffen, die Zeit der Ausfüllung der Mondscheibe und die ihres Erlöschens und Unsichtbarwerdens gab den Monat an, die 12fache Wiederholung dieses Wechselspiels das Mondjahr.

Der Mondlauf als zweckmäßiger Zeitteiler.

Die Zählung nach den Tagen, die der Mond während eines Umlaufs darbot, bildete sich aber auch dort aus, wo nicht gerade ein ausgesprochener Kultus des Mondes bestand. Die regelmäßige Wiederkehr der vier Mondphasen war eben ein für jedermann sichtbares und so eindruckvolles Himmelszeichen, daß der Mond von selbst zum „Ordner der Zeiten“ wurde; ja selbst die Namen für Mond und Monat gehen bei den indogermanischen Sprachen auf den Stamm des Ausdruckes für „Messen“ zurück (vgl. oben S. 8). So meldete bei den Römern der Königszeit der Oberpriester den Tag an, an welchem er die erste schwach leuchtende Mondsichel nach Neumond gesehen hatte; das Volk wurde am folgenden Morgen vor der Curia calabra versammelt und ihm verkündigt, in wieviel Tagen das erste Mondviertel eintreten werde. Nach weiteren acht Tagen versammelte sich abermals das Volk, und der König selbst verkündigte den Tag des Vollmondes (Idus) und die Tage der in den Monat fallenden Feste. Davon mag sich der römische Gebrauch der Rückwärtszählung der Tage von den Idus und Nonae (ersten Vierteln) gegen die Kalendae (Neu-

monde, Monatsanfänge) herschreiben.[1]) Eine teilweise Rückwärtszählung der Tage finden wir auch bei den Athenern seit dem 6. Jahrhundert v. Chr. vor, indem im letzten Monatsdrittel, vom 20. Tage ab, die Tage nach rückwärts (der 21. = der zehntletzte, der 22. = der neuntletzte usf.) gezählt wurden; Solon soll der Urheber dieser Zählung gewesen sein, er „zählte die Tage des Mondes so, wie er diesen selbst dahinschwinden sah." In den ältesten Gesetz- und Religionsbüchern der Inder, den Veda, finden wir überall den Mond schon als Beherrscher der Zeitrechnung. Sein himmlischer Lauf wurde späterhin von den Indern in sehr eingehender Weise für die Zeitrechnung benützt. Für den gläubigen Hindu sind nicht bloß religiöse Handlungen, sondern auch eine Menge geschäftliche, selbst häusliche Verrichtungen an bestimmte tithi gebunden (eine tithi ist der 30. Teil der Zeit zwischen zwei Neumonden), und die günstigen Gelegenheiten zum Somaopfer, zur Anzündung des heiligen Feuers, zur Hochzeit, zum Beginn verschiedener Tätigkeiten usw. knüpfen sich an den gewissen Stand der nakshatra (der Mondhäuser, d. h. feste, durch Sterne begrenzte Bezirke des Himmels, in welche der Mond während seines Laufs eintritt). Man kann annehmen, daß alle Nationen, die nachmals zu einer geordneten Zeitrechnung gelangten, ohne Ausnahme vom Mondjahre ausgegangen sind, auch jene, bei welchen uns nur das Sonnenjahr überliefert ist, z. B. die Ägypter und alten Perser, da auch bei diesen Spuren vorkommen, welche auf den einstigen Gebrauch der Rechnung nach dem Monde hinweisen.

4. Astrologie und Aberglaube.

Ein weiterer Anstoß zur Begründung der Zeitrechnung lag im Volksaberglauben, welcher eine Konsequenz der Astrologie oder vielmehr deren Übersetzung in die Praxis ist. Wenn der Mensch und die Natur den himmlischen Gewalten unterworfen waren, wenn die Zeit, das Jahr und seine Tage, von diesen abhingen, so mußten auch einzelne Tage für bestimmte Handlungen günstig oder ungünstig sein, und man wünschte zu wissen, welche Zeiten man zu vermeiden oder zu bevorzugen hatte. Ein anschauliches Bild solchen Glaubens bei den Griechen gibt uns Hesiod (um 800 v. Chr.) in seiner Dichtung „Werke und Tage". Danach ist der letzte Monatstag günstig, „das Geschäft zu besehen", an das Gesinde die Kost zu verteilen; der erste, vierte und siebente Tag sind geheiligte Tage, der elfte ist für die Schafschur günstig, der zwölfte aber von besonderer Güte, am dreizehnten hat man die Aussaat der Samen zu vermeiden usf. Manche Reste solcher Anschauungen leben selbst im Volksglauben unserer Zeit noch fort.

5. Forderungen der Kultur.

Daß schließlich mit der steigenden Kultur der Völker sich die Notwendigkeit einer geordneten Zeitrechnung einstellte, ist selbstverständlich

1) Die Tage der „Kalenden" galten bei den Römern als geschäftliche Zahltage zur Erfüllung von Zahlungsverbindlichkeiten. Aus dem Worte „Kalendae" ist im Laufe der Zeit die Bezeichnung „Kalender" für die Verzeichnisse entstanden, welche alljährlich die zur Übersicht der Zeitteilung notwendigen Angaben lieferten.

und braucht jedem Denkenden nicht besonders auseinandergesetzt zu werden. Ich erinnere nur daran, welche Rolle die Zeittermine in unserem gesamten Handelsverkehr spielen; ferner, welche große Bedeutung die Datierung und die Zeit überhaupt in unseren Gesetzen, Verträgen und Dokumenten hat; endlich, daß unsere täglichen Handlungen, seien sie der Arbeit oder der Erholung gewidmet, an die Intervalle des Tages oder der Nacht geknüpft sind.

III. Die primitiven Formen der Zeitrechnung. Wenn wir die Entwicklung der Zeitrechnung bis zu einem geordneten System richtig verstehen wollen, so müssen wir auf die einfachsten Formen derselben bei den sogenannten Naturvölkern zurückgehen. Die Art und Weise, wie die großen Kulturnationen, Römer, Griechen usw., ihre Zeitrechnung aufgebaut haben, ist uns bezüglich der ersten Anfänge meist verborgen, da die Kulturgeschichte derselben nicht bis zu diesen Anfängen zurückreicht. Bei den Naturvölkern dagegen tritt uns noch gegenwärtig die unverhüllte Form entgegen. Auch die Kulturnationen werden (bevor sie eben Kulturvölker wurden) mit ihrer Zeitrechnung durch solche Stufen hindurchgegangen sein, wenn sie sich auch bald über diese vermöge ihrer Begabung und günstiger Entwicklungsbedingungen erheben konnten. — Wo der Mensch geringe Lebensbedürfnisse hat, deren Erwerb ihm überdies durch günstige klimatische Verhältnisse leicht gemacht wird, oder wo er vermöge der Lage und Beschaffenheit seines Wohnortes selten oder nie mit anderen Völkern in Kontakt tritt, entwickeln sich die Zeitbegriffe nur in geringem Grade. Dies zeigt sich z. B. in der Zeitrechnung der Stämme, welche die australische Inselwelt und das Innere des australischen Kontinents bewohnen. Viele dieser Stämme kennen noch kein Jahr, sondern schätzen die Zeit nach den Wechseln der trockenen und nassen Jahreszeit, nach dem Eintreten der Monsune, wie die Bewohner von Neuguinea; manche erkennen den Umlauf des Jahres an dem Reifen der Früchte, wie die Bewohner der Shortland-Inseln und des Neu-Georgien-Archipels an der Reifezeit der Kanariennüsse, andere an dem massenhaften Erscheinen von Tieren, wie die Einwohner der Samoainseln seit altersher das regelmäßige Erscheinen des Palolowurms als Zeichen für den Beginn eines neuen Jahres nahmen. In Gegenden, wo scharfe klimatische Abstufungen das jährliche Pflanzen- und Tierleben beherrschen, zählen die Bewohner die Zeit nach einer Anzahl von Jahresabschnitten von unbestimmter Länge, denen sie Namen geben, welche die klimatischen Differenzen und den Wechsel der Tier- und Pflanzenwelt charakterisieren. So haben die verschiedenen Stämme Sibiriens 12 bis 13 Namen für jene Jahresabschnitte: den großen und kleinen Kältemonat, die Zeiten des Kommens und Verschwindens der Schneekruste, des Eisbruchs, den Monat des ersten Grases, der Blüten, des Flachses, der Beeren, der Baumrinde, des Blätterfalls, den Monat des Lachses, des Renntiers, der Seerobben, der Krähen, Raben, Enten, des

Rohe Bestimmung des Naturjahres bei Naturvölkern.

Taucherhuhnes usf. Ahnlich zählen die Indianerstämme Nordamerikas. Die Zahl der Jahresabschnitte, welche bei diesen Völkern zwischen 10 bis 14 schwankt, und ihre ungleiche Länge zeigt, daß es sich bei diesen Abschnitten nicht um Monate in dem Sinne, wie wir diese verstehen, sondern um Vorläufer derselben handelt.

Das Mondjahr.

Erst durch das Eintreten des Mondlaufs in die Zeitrechnung wurden „Monate“ erzeugt. In der Zeitrechnung der oben erwähnten Völker der australischen Inseln bemerken wir schon hier und da die Anfänge vom Zählen mit Mondmonaten, so bei den Neuseeländern und Samoanern; näher dem Begriffe eines Mondjahrs scheint die Jahrform der früheren Zeit auf Tahiti gekommen zu sein, da man dort die Monate mit dem jedesmaligen Neumonde anfing. Auch bei einigen nordamerikanischen Indianerstämmen wird das Mondjahr beachtet (wie bei den Pawnee, Dakota, Cheyenne), man versucht es wenigstens in Rechnung zu bringen. Einigermaßen ausgebildet ist das Mondjahr bei mehreren amerikanischen Eskimostämmen in Ostgrönland, an der Hudsonbay, im Baffinland; dort wird ein 13. Monat bisweilen weggelassen, um mit dem Naturlaufe ungefähr in Übereinstimmung zu bleiben. Bei den Negervölkern Afrikas hat die Zeitrechnung einen ähnlichen tiefen Stand, kaum erhebt sie sich irgendwo zu einem geordneten Mond- oder Sonnenjahre. Eine Ausnahme machen nur jene Völker, welche den Mohammedanismus angenommen haben; mit diesem ist zu ihnen auch das reine Mondjahr übergegangen, selbst die arabischen Namen für die Monate und Wochentage haben sie, mit allerlei sprach-

Das Sonnenjahr.

lichen Entstellungen, akzeptiert. — Während also, wie die vorher aufgeführten Beispiele zeigen, sich die meisten Naturvölker mit einer nur primitiven Ermittelung des Kreislaufes des Jahres und der Monate begnügen, entwickelt sich bei manchen Naturvölkern der Zeitsinn doch so weit, daß man nach Mitteln zu einer besseren Bestimmung der Jahresgrenzen und ihrer Wiederkehrzeiten sucht. Auf Java z. B. half man sich in der Weise, daß man das Landbaujahr aus zwölf ungleich langen Zeiträumen, mangsa genannt, zusammensetzte. Jedes einzelne mangso bezeichnete die Zeit zu irgendeiner Arbeit auf den Feldern und wurde nach dem Mittagschatten der Sonne bestimmt: die Priester beobachten die Länge des Schattens eines aufrechtstehenden Stabs zu verschiedenen Jahreszeiten in der Mittagssonne und konnten, da jedem mangso eine bestimmte Schattenlänge entsprechen sollte, die Anfangszeiten der einzelnen mangsa danach angeben. Als Zeit des ersten mangso, als Jahresbeginn wurde die Jahreszeit betrachtet, wenn das „Pfluggestirn“, d. h. Orion, wieder am Morgenhimmel vor Sonnenaufgang sichtbar ward (Juli). Die Kindjin-Dajak in Zentralborneo bedienen sich dieser mangsa-Rechnung noch jetzt; man findet öfters in ihren Dörfern einen mit Einkerbungen versehenen Stab aufgestellt, nach dessen Schatten die mangsa-Zeiten bestimmt werden. Die Zeit des tugal (Saatfestes), eines für den Ackerbau wichtigen Festes, bestimmen die Dajak am Mahakamflusse dadurch, daß sie den Tag abwarten, an wel-

chem die Sonne an einem bestimmten Punkte des Horizonts untergeht, den sie aus der Tradition ihrer Vorfahren kennen. Zur leichten Auffindung dieses Punktes stellen sie zwei Steine so hintereinander auf, daß die Verbindungslinie beider nach dem Sonnenuntergangspunkte zeigt, welcher den Beginn der Saatzeit angibt. In ähnlicher Weise, durch Beobachtung der Sonnenauf- und -untergangspunkte, setzen die Priester der Hopi-Indianer die Hauptzeiten ihres Zeremonialjahrs (Naturjahrs) fest; für die Wiedererkennung der Sonnenpunkte (Azimute) des längsten und kürzesten Tags errichten sie Steinmarken wie die vorerwähnten Dajak. Ganz ebenso verfahren betreffs Feststellung der Zeiten der Solstitien die Labrador-Eskimo im Ungavalande. Die Inka von Peru sollen auf den Hügeln um Cuzco zwölf Säulen errichtet haben, nach deren Schattenlängen man die Monate ordnete.

Ursprüngliche Hilfsmittel der Kulturvölker zur Bestimmung der Jahreslänge.

Die Kulturvölker müssen in den Anfängen ihrer Zeitrechnung ähnliche Wege gegangen sein. Von den Hilfsmitteln, deren sie sich dabei bedienten, sind hier und da deutliche Spuren vorhanden. Man kann etwa fünf solcher Wege erkennen: 1. Die Beobachtung der Natur, namentlich des Pflanzenlebens. Indem man z. B. die Zeit zu schätzen versuchte, die zwischen demselben Stadium des Wachstums der Gerstenfelder in zwei aufeinanderfolgenden Jahren lag, kam man zu einem ungefähren Begriffe über die Länge des Naturjahres. Da der Stand der Gerste, die Reife der Früchte usw. von den jeweiligen Witterungsverhältnissen abhängt, konnte die Kenntnis des Naturjahres nur eine ganz rohe sein. Solche Beobachtung der Natur wird den Juden des Altertums durch die mosaischen Satzungen direkt befohlen, um die drei agrarischen Hauptfeste des Jahres zur richtigen Jahreszeit feiern zu können (vgl. oben S. 60). Den Ägyptern gaben ohne Zweifel die regelmäßig und alljährlich sich erneuernden Nilüberschwemmungen den ersten Begriff über die Länge des Jahres.

1. Beobachtung der Vegetation.

2. Die Beobachtung des Sternhimmels während des Jahres. Diese lehrt, daß innerhalb eines Jahres (infolge des Umlaufs der Erde um die Sonne) ein vollständiger Umschwung der sichtbaren Sternbilder stattfindet. Stehen sich Stern und Sonne im Horizonte einander gegenüber, d. h. geht der Stern auf, wenn die Sonne untergeht, so nennt man diesen Sternaufgang den wahren akronychischen Aufgang; der umgekehrte Fall (wenn der Stern zur Zeit des Sonnenaufgangs untergeht) heißt der wahre kosmische Untergang des Sterns. Ebenso wird es vorkommen, daß Auf- und Untergänge von Sonne und Stern genau zur selben Zeit erfolgen. Diese genannten zwei Arten von Aufgängen und zwei Arten von Untergängen können mit freiem Auge nicht wahrgenommen werden, da das Sonnenlicht in allen vier Fällen den Stern vollständig überstrahlt. Wenn nun aber durch das Vorauseilen der Sternzeit (s. nächstes Kapitel) der Stern allmählich früher aufgeht als die Sonne, so wird der Stern schließlich wieder sichtbar werden, also in der Morgendämmerung hervortreten: dieser Sternaufgang heißt der heliakische. Umgekehrt, wenn die Aufgangszeiten des Sterns in die Abendstunden ge-

2. Beobachtung des jährlichen Umschwungs des Sternhimmels.

rückt sind, wird man den Aufgang noch so lange wahrnehmen können, als die Sonne tief genug unter dem Horizonte steht. Den letzten noch sichtbaren Sternaufgang nennt man den scheinbaren akronychischen. Zwei andere entsprechende Verhältnisse geben die Untergänge: den letzten noch wahrnehmbaren Sternuntergang in der Abenddämmerung bezeichnet man als den heliakischen Untergang und den ersten in die Morgendämmerung fallenden Untergang als scheinbaren kosmischen Untergang.

Diese (sogenannten jährlichen) Sternerscheinungen, das Verschwinden und Wiederkommen, sind besonders an einzelnen hellen Sternen recht auffallend und haben deshalb schon früh die Aufmerksamkeit der Menschen angeregt. Einzelne Naturvölker benützen noch jetzt die Sternerscheinungen zur Regulierung ihres Jahres; so die ostgrönländischen Eskimo, welche ihren Jahresanfang in die Jahreszeit setzen, wenn der Stern Asit (Sternbild des Adlers) sich wieder zum erstenmal in der Morgendämmerung zeigt, d. h. im Spätherbst; die Dajak warten mit der Feldbestellung bis zur Zeit des heliakischen Aufgangs des Plejadengestirns, ebenso die Atchinesen. Auch manche von den Kulturnationen haben einstens die jährlichen Sternerscheinungen zur Bestimmung des Jahresanfangs gebraucht. Einer von den Monatsnamen, welche noch in die sehr alte Zeit (Dynastie Ur) der Babylonier gehören, bedeutet wörtlich „Sendung (oder Botschaft) der Istar“ und bezieht sich auf das jährliche Sichtbarwerden des Sternbildes der Jungfrau (Spica). Letzteres Sternbild wird als „die Verkündigerin des sprießenden Getreides“ aufgefaßt. Wenn der heliakische Aufgang der Jungfrau, der in die Jahreszeit fiel, in welcher das erste Grünen der Halme zu bemerken war, mit dem erwähnten Monate übereinstimmte, so ersahen die Babylonier hieraus, daß ihr Jahr mit der Sonne in Ordnung lief; andernfalls aber hatten sie einen Monat einzuschalten oder wegzulassen, um mit der Sonne in Übereinstimmung zu bleiben.

3. Beobachtung der Sonnenstände am Horizonte.

3. Die Beobachtung der Sonnenstände am Horizonte. Durch diese konnte man die Länge des Sonnenjahres — welche nach den beiden vorerwähnten Methoden noch ziemlich unbestimmt blieb — etwas besser erkennen. Wir haben diese Methode in primitiver Weise von den Dajak, den Hopi, Eskimos und Inka anwenden sehen. Manche Kulturnationen waren aus Gründen der Religion genötigt, ihre Tempel nach bestimmten Richtungen gegen den Horizont zu orientieren, d. h. die Achsen der Tempel nach bestimmten Azimuten der Sonne hin anzulegen, worüber schon S. 12 Näheres gesagt ist. Die bei den Priestern in Übung gekommene Verfolgung der Auf- und Untergangspunkte der Sonne hatte auch für die Zeitrechnung ein Ergebnis: indem man die Tage zählte, welche zwischen den Zeiten lagen, in denen die Sonne in denselben Jahreszeiten bei ihrem Untergange (oder Aufgange) ein und dasselbe Azimut erreichte, kam man aus vielen Beobachtungen darauf, daß das Jahr etwa 365 Tage fassen müsse. Zu solchen Beobachtungen genügten anfänglich feststehende Marken, später waren die nach den Himmelsrich-

tungen orientierten Tempel für diese Beobachtungen sich von selbst darbietende Observatorien.

4. Beobachtung des Neumondes.

4. Die Beobachtung des Mondneulichtes. Da die Kulturnationen in der frühesten Zeit noch ohne jedes Hilfsmittel waren, den Tag berechnen zu können, wann die Konjunktion des Mondes, d. h. der jeweilige Neumond eintritt, so waren sie auf die Konstatierung der ersten feinen Mondsichel angewiesen, welche bald nach dem Neumonde tief am Abendhimmel sichtbar wird. Die Abzählung der Tage zwischen je zwei solchen Sichelerscheinungen (dem wiederkehrenden Neulichte) gab die ungefähre Länge des Mondmonats und die Weiterführung dieser Beobachtungen die Länge des Mondjahres. Das Intervall zwischen der Konjunktion und der mit freiem Auge erkennbaren Sichel beträgt im Mittel etwa $1\frac{1}{2}$ Tage, ist jedoch mit der Mondstellung gegen die Ekliptik ziemlich schwankend. Deshalb dauerte es lange Zeit, bis man für die Länge des Mondjahres den wirklich zutreffenden Betrag ermittelt hatte. Da der Monat mit dem Abende, an welchem das Neulicht erschien, begonnen wurde, so hatte die Bestimmung des Neulichtes für alle nach dem Monde rechnenden Völker ungemeine Wichtigkeit. Die Babylonier besaßen, wie aus ihren astronomischen Tafeln hervorgeht, kaum vor dem 3. oder 4. Jahrhundert v. Chr. die Mittel, die Neulichtzeit rechnerisch voraus angeben zu können. Die Juden haben sich fast das ganze Altertum hindurch nur auf die direkte Beobachtung des Neulichttages verlassen und sind erst spät zu einer zyklischen Berechnung des Neulichtes gelangt.

5. Willkürliche Schaltung.

5. Die willkürliche Schaltung. Die Ein- oder Ausschaltung von Monaten in das Jahr je nach der sich zeigenden Notwendigkeit, also nach freiem Ermessen, bildet das am häufigsten gebrauchte Hilfsmittel bei den in dem Aufbau ihrer Zeitrechnung begriffenen Kulturnationen. Wenn man bemerkte, daß das Mondjahr, mit welchem gerechnet wurde, gegen den Sonnenlauf, d. h. gegen die unter 1., 2., 3. angeführten Kennzeichen in Konflikt kam, ließ man je nach der Notwendigkeit einen ganzen Mondmonat im Mondjahre aus oder schaltete einen solchen ein. Dieses Auskunftsmittel ist z. B. von den Babyloniern seit den ältesten Zeiten bis zum 6. Jahrhundert v. Chr. herab gebraucht worden. Aus der Zeit des Hammurabi (2194—2152 v. Chr.) ist der an einen Vasallenkönig gerichtete Befehl erhalten: „Weil das Jahr eine Abweichung hat, so laß den Monat, der nun beginnt, als zweiten Elul (d. h. Schaltmonat) aufzeichnen; und anstatt daß der Tribut am 25. Tage des Monats Tisri in Babylon fällig werde, laß ihn auf den 25. Tag des zweiten Elul verlegen.“ Erst im 6. Jahrhundert v. Chr. zeigt sich bei den Babyloniern, wie F. X. Kugler dargetan hat, der Gebrauch eines zyklischen, d. h. auf Rechnung und Regel basierten Schaltungssystems.

IV. Die astronomischen Grundlagen der Zeitrechnung. Je mehr sich bei den Kulturvölkern der Zeitsinn infolge steigender Zivilisa-

tion entwickelte, desto mehr mußten sie sich von der Notwendigkeit überzeugen, daß nur die genauere Erforschung der Mond- und Sonnenbewegung sie schließlich zu einer geordneten Zeitrechnung führen könne. Die Beobachtung des Himmels wurde nun immer mehr in der Absicht betrieben, die Bewegung der Himmelskörper kennen zu lernen und zur Messung der Zeit zu verwerten. So entstand nach und nach die wissenschaftliche Astronomie und wurde Selbstzweck. Man sagt nicht zu viel, wenn man behauptet, daß es ohne ein Streben nach geordneter Zeitrechnung vielleicht keine Astronomie gegeben haben würde; jedenfalls ist der erste Impuls zur Anstellung astronomischer Beobachtungen von dem Bedürfnisse der Zeitmessung gegeben worden.

Wir müssen nun die astronomischen Konstanten und Verhältnisse erörtern, deren Kenntnis der Mensch sich allmählich zu erwerben suchte.

Die Zeit, welche zwischen den Momenten zweier aufeinanderfolgender Konjunktionen des Mondes, d. h. zwischen zwei Neumonden liegt, nennt man den synodischen Monat. Die Länge des synodischen Monats beträgt 29 Tage 12 Stunden 44 Minuten 3 Sekunden; zwölf solcher Monate faßt man als ein Mondjahr zusammen, so daß dieses also 354 Tage 8 Stunden 48 Minuten 36 Sekunden enthält. In der praktischen Zeitrechnung kann man nur mit ganzen Tagen, Monaten und Jahren ohne Überschüsse rechnen; durch die Vernachlässigung der Überschüsse aber würde man arge Fehler begehen. Es tritt daher die Notwendigkeit auf, den Überschuß des synodischen Monats über 29 Tage, nämlich die 12 Stunden 44 Minuten 3 Sekunden, wenn man die Monatslänge von nur 29 Tagen beibehalten will, durch Verteilung auf einen längeren Zeitraum wieder einzubringen. Dies kann geschehen[1]), indem man abwechselnd 30tägige und 29tägige Monate oder, wie sie bei den Alten hießen, volle und hohle Monate aufeinanderfolgen läßt. Die aus dem Überschusse von 12 Stunden 44 Minuten 3 Sekunden mit der Zeit anwachsenden Tage lassen sich in einer größeren Periode unterbringen, wenn die Zahlen der vollen und der hohlen Monate in dieser Periode entsprechend gewählt werden. Eine ungefähre Ausgleichung des Überschusses wird erzielt, wenn man unter 15 Monaten 7 als hohle ansetzt; eine fast vollständige, wenn unter 49 Monaten, d. i. 1447 Tagen, 26 volle und 23 hohle Monate verteilt werden, da die Tageszahl der letzteren beiden zusammen sehr nahe gleich 1447 Tagen ist. Von den letztgenannten Verteilungsarten haben die alten Kulturvölker keinen Gebrauch gemacht, da die Durchführung dieser Verhältnisse in der Praxis unbequem wird; sie begnügten sich damit, während des Mondjahres volle Monate mit hohlen abwechseln zu lassen.

Mondjahr.

1) Der obengenannte Überschuß $12^h 44^m 2{,}98^s = 45842{,}98^s$; $^1/_{100}$ Tag $= 864^s$, daher der Überschuß $= \frac{458{,}4298}{864}$ Tage. Die Ergänzung zu einem Monat von 30 Tagen ist $= \frac{405{,}5702}{864}$ Tage. Die Verwandlung dieses Bruches in einen Kettenbruch gibt die Näherungsbrüche $\frac{1}{2}, \frac{7}{15}, \frac{8}{17}, \frac{23}{49}$ usw. Der erste dieser Werte zeigt schon an, daß man jeden zweiten Monat zu 29 Tagen wird annehmen müssen.

Wenn man die Länge des Mondjahres nur zu $12 \times 29\frac{1}{2} = 354$ Tagen rechnet, würde in jedem Jahre eine Vernachlässigung von 8 Stunden 48 Minuten 36 Sekunden begangen werden. Bei der Rechnung mit einem solchen unrichtigen Mondjahre würden sehr bald die berechneten Neu- und Vollmonde und anderen Phasen nicht mehr mit den wirklichen stimmen. Man muß deshalb den vernachlässigten Überschuß dadurch einbringen, daß man zeitweise das Mondjahr zu 355 Tagen, als Mondschaltjahr ansetzt. Durch eine entsprechende Periode der Gemein- und Schaltjahre kann eine vollständige Verteilung des Überschusses bewirkt werden. Das synodische Mondjahr hat 354,36707 Tage, welcher Betrag durch den gemischten Bruch $354\frac{79{,}285}{216}$ ausgedrückt werden kann. Durch Verwandlung des letzteren in einen Kettenbruch erhält man die Näherungsbrüche $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{3}{8}, \frac{4}{11}, \frac{7}{19}, \frac{11}{30}$. Die Brüche $\frac{3}{8}$ und $\frac{4}{11}$ zeigen an, daß man in 8 Jahren 3mal oder in 11 Jahren 4mal ein Schaltjahr einzuführen hat. Setzt man innerhalb eines Zyklus von 8 Mondjahren (= 2834 Tagen 22 Stunden 28,8 Minuten) 5 Jahre zu 354 und 3 zu 355 Tagen an, so erhält man $5 \cdot 354 + 3 \cdot 355 = 2835$ Tage. Noch besser ist die Anwendung eines 30jährigen Zyklus; ein solcher Mondzyklus hat 10631 Tage und zerfällt in 19 gemeine Jahre zu 354 und 11 Schaltjahre zu 355 Tagen ($19 \cdot 354 + 11 \cdot 355 = 10631$). Beide Zyklen werden ihrer Ausgleichsfähigkeit wegen in der arabisch-türkischen Zeitrechnung angewendet. Werden in einem solchen Zyklus die Schaltjahre in passender Weise[1]) eingereiht, so stimmen die danach berechneten Zeiten der Mondphasen recht befriedigend mit den tatsächlichen überein. Eine solche Jahrform, die auf die erwähnten Mondschaltungzyklen basiert ist, folgt zwar dem Mondlauf, nicht aber der Sonne; sie wird deshalb die Jahrform des reinen Mondjahres genannt. Da das Mondjahr um etwa 11 Tage kürzer ist als das Sonnenjahr, so bewegen sich die Datierungen des reinen Mondjahres ganz unabhängig vom Sonnenlaufe und den Jahreszeiten; z. B. war der Anfangstag des mohammedanischen Jahres 1306, der 1. Moharrem am 8. September 1888, der Anfangstag des Jahres 1316 aber am 22. Mai 1898.

Schaltung im Mondjahr.

Reines Mondjahr.

Das reine Mondjahr würde für die alten Völker unbrauchbar gewesen sein, da sie in ihrer Zeitrechnung nicht bloß mit dem Mondlaufe, sondern auch mit der Sonne übereinkommen mußten. Ihr Bestreben war deshalb von Anfang an darauf gerichtet, ein an Mond und Sonne gleichzeitig angeschlossenes Mond-Sonnenjahr, oder wie es auch genannt wird, ein gebundenes Mondjahr oder Lunisolarjahr herzustellen. Die mittlere Länge des tropischen Sonnenjahres[2]) beträgt jetzt 365 Tage 5 Stunden

Gebundenes Mondjahr.

1) In dem 8jährigen Zyklus nehmen die Türken das 2., 5. und 7. Jahr als Schaltjahre, für den 30jährigen Zyklus setzten die arabischen Astronomen jedes 2., 5., 7., 10., 13., 16., 18., 21., 24., 26., 29. Jahr als Schaltjahr an.

2) Tropisches Jahr heißt die Zeit des Sonnenlaufes vom Frühlingspunkte der Ekliptik (Widder, gegenwärtig am 21. März) bis wieder zu diesem Punkte zurück; da die Lage des

48 Minuten 46 Sekunden oder 365,24220 Tage. Das gemeine Mondjahr (s. oben) ist um etwa 11 Tage kürzer als das tropische Jahr; man wird daher beide Jahresarten in ungefähre Übereinstimmung bringen können, wenn man in einem längeren Zyklus, welcher das Lunisolarjahr in sich faßt, etwa jedes dritte Jahr ein Mondschaltjahr von 13 synodischen Monaten sein läßt. Die genauere Ermittlung der kommensurablen Verhältnisse des Lunisolarjahres hat den Alten ungemeine Schwierigkeiten gemacht, und sie sind darin nur mit allmählichen Näherungen weiter gekommen.[1]) Das eine dieser Verhältnisse, die sie anwandten, war die Oktaëteris: acht tropische Jahre (= 2921,938 Tage) sind nämlich bis auf eine Differenz von $1\frac{1}{2}$ Tagen 99 synodischen Monaten gleich (2923,528 Tage); man hat also in einem Zyklus von acht Jahren fünf gemeine Mondjahre zu 12 Monaten und drei Mondschaltjahre zu 13 Monaten (zusammen 99 Mondmonate) anzusetzen, um das Lunisolarjahr nahe auszugleichen. Noch besser war der 19jährige Zyklus, auch der Metonsche genannt (um 432 v. Chr. aufgestellt), in welchem sieben Mondschaltjahre gesetzt werden: 19 tropische Jahre (= 6939,6018 Tage) sind sehr nahe 235 synodischen Monaten (12 gemeinen plus 7 Mondschaltjahren oder 6939,6884 Tagen) gleich. Eine weitere Verbesserung, der 76jährige Zyklus, wurde von Kallippos, und der 304jährige von Hipparch vorgeschlagen[2]), beide Vorschläge fanden aber keine Verwendung.

Schaltungen der Alten.

Sieht man in der Regulierung der Zeit vom Mondlaufe ganz ab, so bleibt als praktische Zeitrechnung nur die nach der Sonne übrig. Die mittlere Länge des Sonnenjahres beträgt, wie oben angegeben, 365 Tage 5 Stunden 48 Minuten 46 Sekunden, erfährt aber im Laufe der Zeit eine geringe Verkürzung, etwa $5\frac{1}{2}$ Sekunden in je 1000 Jahren. In der Chronologie vernachlässigt man den letzteren geringen Betrag. Würde die Länge des tropischen Jahres nur zu 365 Tagen angenommen, der jährliche Überschuß von 5 Stunden 48 Minuten 46 Sekunden also nicht wieder rechnerisch eingebracht werden, so entstände ein Wandeljahr, d. h. ein solches Jahr hätte keinen festen Platz in den Jahreszeiten (dem

Sonnenjahr.

Frühlingspunktes nicht fest, sondern etwas schwankend ist, bleibt die Länge des tropischen Jahres nicht für alle Jahre die gleiche; der Durchschnittswert heißt die mittlere Länge. Die Veränderung (Abnahme) der Länge des tropischen Jahres beträgt nach Newcomb in einem Jahrtausend 0,0000614 Tage. Danach war um 3000 v. Chr. die Jahreslänge $365^d\,5^h\,49^m\,12^s$.

1) Zur Ermittlung der brauchbaren Schaltungsmethoden hat man das Verhältnis zwischen dem tropischen Sonnenjahr und dem synodischen Mondmonat 365,24220 : 29,53059 wieder in einen Kettenbruch zu verwandeln und aus diesem die Näherungsbrüche abzuleiten; es ergeben sich die Näherungen $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{4}{11}$, $\frac{7}{19}$, $\frac{123}{334}$ usw. Das dritte dieser Verhältnisse führt auf die Octaëteris, das fünfte auf Metons Zyklus.

2) Meton nahm den 19jährigen Zyklus zu 6940 Tagen an, sein Sonnenjahr war also $365\frac{5}{19}$ Tage, daher gegen das julianische ($365\frac{1}{4}$) um $\frac{1}{76}$ Tag zu groß; Kallippos beseitigte die letztere Differenz durch den 76jährigen Zyklus von 27759 Tagen ($76 \cdot 365\frac{1}{4}$). Hipparch korrigierte wiederum das Jahr des Kallippos um $\frac{1}{300}$ Tag, indem er 111035 Tage gleich 304 Jahren setzte, letztere enthielten 3760 Mondmonate.

Sonnenlaufe), und sein Neujahr durchliefe, im Widerspruche mit der Natur, in etwa 1500 Jahren alle Jahreszeiten. Der erwähnte jährliche Überschuß kann auf mehrfache Weise in Rechnung gezogen werden.[1]) Gibt man alle vier Jahre zu dem 365tägigen Jahre einen Tag hinzu, so hat man eine mittlere Jahreslänge von $365\frac{1}{4}$ Tagen; ein solches Jahr wird nach je 128 Jahren wieder um einen Tag vom richtigen Sonnenjahr abweichen. Ein genaueres Verhältnis läßt sich erreichen, wenn in einem Zyklus von 29 Jahren je 7 Schaltjahre (zu 366 Tagen) eingelegt werden oder in 33 Jahren je 8 Schaltjahre, und eine sehr gute Übereinstimmung würde erzielt, wenn in einem Zyklus von 128 Jahren 31 Schaltjahre zu 366 Tagen gezählt würden, denn dann weicht die dadurch hergestellte mittlere Länge des Jahres gegen die wirkliche um kaum $1\frac{1}{2}$ Sekunden ab. Diese letztgenannten Verhältnisse sind jedoch für die chronologische Praxis nicht bequem, und die gregorianische Kalenderreform hat sich deshalb auf andere Weise geholfen (s. unter VII).

Darlegung des vermutlichen Erkenntnisweges.

Der Weg, welchen die Kulturvölker zur Ermittlung der genannten Konstanten und Verhältnisse von den einfachsten Anfängen aus verfolgt haben mögen, ist ungefähr folgender. Die naheliegendste Erkenntnis war jene der Länge des siderischen Mondmonats. Man bemerkte leicht, daß der Mond in seiner scheinbaren Bewegung täglich gegen die Sterne zurückblieb, und daß etwa 27 Tage verflossen, bevor er wieder in die Nähe desselben Sternbildes gelangte. Hierauf gründeten schon in uralter Zeit einige Kulturvölker die 27 oder 28 sogenannten Mondhäuser, nämlich Sternbilder von bestimmter Lage, in welche der Mond alljährlich sukzessive gelangt. Obwohl anfänglich nur zur Verehrung des Mondes dienend, erhielten hier und da die Mondhäuser auch einen zeitrechnerischen Zweck. Man nahm im Jahre ein 13 bis 14maliges Zusammentreffen des Mondes mit ein und demselben Stern, z. B. mit Antares an und regulierte durch zeitweises Weglassen eines solchen Zusamentreffens das für die Vornahme der Feldarbeiten nötige landwirtschaftliche Naturjahr. Ein solches siderisches Mondjahr hat z. B. schon in der vedischen Literatur der alten Inder eine hervorragende Bedeutung (Nakshatrajahr), ja selbst gegenwärtig kommt es bei den Atchinesen auf Sumatra, jedenfalls aus Resten altindischer Kultur importiert, in Form der sog. Kenong-Rechnung vor.

Vorbereitende Versuche. Die Mondhäuser, siderischer Monat.

Das Sonnenjahr kannten die Kulturvölker anfänglich ebenfalls nur in der rohen Form eines Naturjahres. Von den Römern heißt es, daß sie in der ältesten Zeit ein zehnmonatliches Jahr gehabt haben sollen, und Plutarch gibt an, daß die Monate bei ihnen „sehr verworren und widersinnig", einige in der Länge von 20 Tagen, andere von 35 und mehr Tagen gewesen seien.[2]) Man hat diesen Bericht als „Märchen" hinstellen wollen.

1) Der Überschuß $5^h\,48^m\,46^s{,}43$ oder $20926{,}43^s$ gibt in 100fachen Tagen ausgedrückt $\frac{2092643}{8640000}$ Tage. Nach der in den vorhergehenden Anmerkungen angedeuteten Ermittlungsart der Näherungen erhält man hier die Brüche $\frac{1}{4}$, $\frac{7}{29}$, $\frac{8}{33}$, $\frac{31}{128}$, $\frac{101}{417}$ ...

2) Von den Italikern berichtet Censorin über ähnliche sehr differierende Monatslängen.

Er gewinnt aber sehr an Wahrscheinlichkeit, wenn man ihn richtig, d. h. von der ethnologischen Seite betrachtet: dann werden aus den ungleichen zehn „Monaten" die willkürlichen, dem Naturleben angepaßten Jahresabschnitte, die wir zahlreich bei den Naturvölkern als Anfänge des Naturjahres angetroffen haben. Außer dem siderischen Mondumlauf, der Rückkehr des Mondes zu denselben Fixsternen, muß sich aber auch sehr früh der synodische, d. h. die Wiederkehr derselben Mondphasen, der Beobachtung der primitiven Völker aufgedrängt haben, und man fand auch hierin ein einfaches Mittel zur Zeitmessung. Man zählte also zunächst wohl nach den Zwischenzeiten, die zwischen den Lichtphasen des Mondes liegen, und erhielt, indem man von Neulicht zu Neulicht rechnete, einen ungefähren Begriff von der Länge des synodischen Monats. Nach dem darauf gegründeten Mondjahre wurden die Monatsanfänge voraus angesagt, daneben wurde die Zeit der an die Jahreszeiten gebundenen Feste nach der Beobachtung der Natur, dem Wiedererscheinen der Sternbilder und nach den Sonnenazimuten bestimmt. Wenn offenkundig wurde, daß die Mondrechnung gegen die Zeichen verstieß, welche den Gang der Sonne markierten, schaltete man einen Mondmonat in das Jahr ein oder ließ einen solchen weg, je nach Bedarf. Dieses Hilfsmittel haben wir selbst die Babylonier, das in der Astronomie bedeutendste Volk des Altertums, durch Jahrhunderte hindurch anwenden sehen.

Mondphasen, synodischer Monat.

Allmählich fing man an, nach den Verhältnissen zu suchen, welche zwischen dem Mondjahre und dem Sonnenjahre bestehen. Wir können die Entdeckung dieser Verhältnisse namentlich bei den Griechen verfolgen. Der Durchschnittsbetrag von $29\frac{1}{2}$ Tagen für den synodischen Monat ist jedenfalls schon sehr frühe gefunden worden und damit auch die Länge von 354 Tagen für das Mondjahr. Die Verfolgung der Mondphasen muß aber bald gezeigt haben, daß man das Mondjahr hin und wieder, um mit jenen in Übereinstimmung zu bleiben, zu 355 Tagen annehmen müsse. Schließlich kam man darauf, unter je acht Mondjahren drei zu 355 Tagen anzusetzen, wodurch die Gesamttageszahl dieser Mondjahre, nämlich 2835 ($354 \cdot 5 + 355 \cdot 3 = 2835$) nahe ganz mit acht wirklichen Mondjahren ($354{,}367 \cdot 8 = 2834{,}94$) übereinstimmte. Mit dieser Periode konnte man sich von den Mondphasen nicht viel entfernen; die Periode gestattete aber auch, wenn ihre Tageslänge durch die Zahl der enthaltenen Monate ($2835 : 96$) dividiert wurde, die Ableitung eines genaueren Durchschnittswertes des synodischen Monats.

Erste Aufstellung von Schaltungen.

Die achtmalige Rückkehr des Sonnenjahres — etwa die achtmalige Rückkehr zum selben Azimute — und die Abzählung der Mondwechsel in derselben Zeit wird nach und nach die Tatsache haben erkennen lassen, daß etwa 99 synodische Monate den acht Sonnenjahren gleichkommen. Jetzt handelte es sich um die Länge dieses achtjährigen Zeitraumes, welcher sowohl der Mondbewegung wie der Sonnenbewegung zu genügen schien. Nahm man nur den ganz rohen Wert von $29\frac{1}{2}$ Tagen für den

Monat an, so hatte man für die achtjährige Periode $29\frac{1}{2} \cdot 99 = 2920\frac{1}{2}$ Tage, die mit acht Sonnenjahren zu 365 Tagen (= 2920 Tagen) fast gleich waren. Bald konnte man sich aber davon überzeugen, daß diese rohe Oktaëteris von den Mondphasen wie von den Jahreszeiten abwich, also in den Voraussetzungen noch fehlerhaft sein mußte. Man versuchte die Sache nun mit einem etwas genaueren Betrage des synodischen Monats (welchen man, wie oben bemerkt, bereits kennen konnte), oder man nahm das Sonnenjahr etwas länger an. Blieb man bei dem Betrage $365\frac{1}{4}$ Tage stehen, so hatte die Oktaëteris 2922 Tage, bei welcher für die Länge des Mondmonats $2922 : 99 = 29\frac{51}{99}$ Tage oder 29,51515 Tage resultieren. In der Tat ist diese achtjährige Periode das erste kommensurable Verhältnis gewesen, welches nach Geminos die Griechen im 7. Jahrhundert aufgefunden haben.[1]) Man kam aber bald mit dieser Oktaëteris nicht mehr zurecht: denn da der wahre Betrag des synodischen Monats 29,53059 Tage ist, wichen schon nach einer Oktaëteris die berechneten Neu- und Vollmonde um $1\frac{1}{2}$ Tage vom Himmel ab, und nach Verlauf von zehn Perioden würden die Neumonde auf das Datum der Vollmonde gefallen sein. Da die Anfangszeiten der griechischen Monate aber an die Neumonde geknüpft waren, verbesserte man — und wie es heißt, ging diese Verbesserung von dem Gesetzgeber Solon aus — die Oktaëteris um jene $1\frac{1}{2}$ Tage, nahm also $2923\frac{1}{2}$ Tage dafür an. Auf die Dauer konnte auch diese Periode nicht genügen, da eben die zugrunde liegenden Beträge für den Mondmonat und das Sonnenjahr noch falsch waren. Die Sachlage verbesserte sich daher bei den Griechen erst, nachdem sich ihre Gelehrten der Astronomie zugewendet hatten. Besondere Schwierigkeiten machte ihnen die genauere Bestimmung der Länge des tropischen Jahres. Die aus den Zyklen des Oinopides, Harpalos, Demokrit folgenden Jahreslängen sind noch ziemlich ungenau. Meton war, wie es scheint, der erste, der die Zeit der Solstitien (Sommer- und Winterwenden) nicht mehr bloß an Berggipfeln, natürlichen Marken und an dem Gnomon, sondern mit Instrumenten (Heliotropion?) beobachtete. Er gelangte so auch zu der ersten ungefähr brauchbaren lunisolaren Periode, dem schon erwähnten 19jährigen Zyklus, welche späterhin von Kallippos verbessert wurde.

Erste auf einem Zyklus beruhende Schaltung.

V. Die Jahrformen der alten Kulturvölker. Aus den bisherigen Auseinandersetzungen über die Zeitrechnung der Natur- und Kulturvölker folgt: 1. daß die Entwicklung der Zeitrechnung bei den verschiedenen Kulturnationen eine meist selbständige sein konnte, da die gegebenen

Jahrformen der Alten.

1) Bei den Erklärungen des Geminos (er lebte im 1. Jahrhundert v. Chr.) ist wohl zu beachten, daß ihm das $365\frac{1}{4}$tägige Sonnenjahr noch ein Dogma ist, und daß darauf seine Darstellung der griechischen Oktaëteris basiert wird. In Wirklichkeit haben die Griechen ihre rohe Oktaëteris jedenfalls mit dem noch ungenauen Betrage des synodischen Monats gefunden und nicht mit dem $365\frac{1}{4}$tägigen Jahre, da sie über das Sonnenjahr noch einige Jahrhunderte später in Zweifel waren.

Grundbedingungen überall die gleichen waren, und daß man deshalb Entlehnungen oder Übertragungen der Jahrformen von einem Volke zum andern nur im Notfalle gelten lassen darf; 2. daß die Voraussetzung von Kenntnissen der genaueren astronomischen Verhältnisse schon für die frühen Stufen der Zeitrechnung ein entwicklungsgeschichtlicher Fehler ist (er kommt in gewissen Entwicklungstheorien vor), weil jene Kenntnisse nur nach und nach erworben werden konnten.

Wir betrachten nun in Kürze die Jahrformen der hauptsächlichsten Kulturvölker des Altertums.

Juden. Die Juden sind unter diesen Völkern, soweit sich jetzt ihre zeitrechnerische Entwicklungsgeschichte übersehen läßt, am spätesten zu einem bloß auf die Rechnung gegründeten Systeme gelangt. Den größten Teil des Altertums hindurch bildeten bei ihnen die primitiven Hilfsmittel, das Ausschauen nach dem Tage des Mondneulichtes, die Beobachtung der Natur und die willkürliche Schaltung die Regulatoren ihres Lunisolarjahres. Nach dem Neulichte bestimmte man die Anfänge der Monate, nach dem Wachstum auf den Feldern die Zeit der Feste und ordnete durch eventuelle Einschaltung eines Monats den Jahresanfang. Als die Zeit des letzteren betrachtete man den Herbst. Die Priesterschaft rechnete aber seit der Rückkehr der Juden aus dem babylonischen Exil mit einem im Frühjahr (Nisan) beginnenden Jahre, welches auf die Festgesetzgebung beschränkt blieb: der volkstümliche (bürgerliche) Jahresanfang war auch weiterhin der Herbst (Tišri). Gegen die Zeit Christi hin mehren sich die Anzeichen, daß Versuche gemacht worden sind, die Monatsanfänge zyklisch, d. h. durch Rechnung (statt durch Beobachtung des Neulichtes) zu bestimmen, und außerdem die Länge des Sonnenjahres kennen zu lernen (Tekupha-Rechnung). Nachdem die Juden ihre politische Selbständigkeit verloren hatten und nach allen Ländern des Okzidents auswanderten, nahmen die Schwierigkeiten zu, den Gläubigen auf die alte Weise (durch Boten) den Kalender zugänglich zu machen und ihnen die Feste rechtzeitig bekannt geben zu können. Es kam deshalb schließlich zu einer Reform der jüdischen Zeitrechnung, an welcher wahrscheinlich die jüdische, im 2. Jahrhundert n. Chr. besonders aufblühende Kolonie in Babylonien einen wesentlichen Anteil hat, und bei der möglicherweise auch altbabylonisches Wissen verwendet worden ist.[1]) Wann die Reform vollendet war und wer als Urheber derselben gilt, ist unbekannt. Das neue System ist ziemlich kom-

---

1) Die mittlere Länge des synodischen Monats ist nach der Reform 29 Tage 12 Stunden 44 Minuten $3^1/_3$ Sekunden, also ganz mit der Annahme der Babylonier übereinstimmend. Nach der Tekupha des Rabbi Adda ist die Länge des tropischen Jahres 365 Tage 5 Stunden 55 Minuten $25^1/_2$ Sekunden, nur um 30 Sekunden von dem aus babylonischen Tafeln folgenden Betrage verschieden. Die obengenannte Schaltungsregel (3., 6., 8., 11., 14., 17., 19. Jahr) wurde nach dem gelehrten Albiruni (973—1048 n. Chr.) vornehmlich von den Juden der babylonischen Kolonie angewendet. Vgl. Ginzel, Handb. d. math. u. techn. Chronol. II. Bd. 1911, S. 70—80.

pliziert (man unterscheidet darin z. B. sechserlei Jahresarten zu 354, 384, 355, 385, 353 und 383 Tagen); in 19 Jahren sollte siebenmal je ein Monat eingeschaltet werden, und zwar im 3., 6., 8., 11., 14., 17., 19. Jahre des Zyklus. Der alte Modus der Überwachung des direkten Beobachtens des Neulichtes durch Zeugenverhöre seitens des Synedriums (Kalenderrates) wurde durch die Reform überflüssig.

Römer. Die Römer hatten als Jahrform anfänglich (nach ihrem sogenannten zehnmonatlichen Jahre) einen sonderbaren vierjährigen Zyklus, welcher aus zwei Gemeinjahren zu 355 und zwei Schaltjahren von 378 und 377 Tagen bestand, also 1465 Tage faßte. Die Monate hatten in den Gemeinjahren 31 und 29 Tage, in den Schaltjahren wurden 23 bzw. 22 Tage, und zwar im Februar zwischen dem Feste der Terminalien und dem Regifugium eingefügt. Zur Erklärung dieser Jahrform sind verschiedene Hypothesen (Herleitung aus der griechischen Oktaëteris u. a.) aufgestellt worden; die wahrscheinlichere Deutung erreicht man aber mit der Annahme, daß der Zyklus aus einem noch ungenauen Betrage des Mondmonats ($29^6/_{10}$ Tagen) und aus der früheren Form des Mondjahres hervorgegangen ist.[1]) Das Jahr sollte im Frühjahre (im Monat Martius = März) beginnen. Da die Tageslänge des vierjährigen Zyklus (1465 : 4) auf $366^1/_4$ Tage für das Sonnenjahr führt, also das letztere um einen ganzen Tag zu lang macht, so konnte der Zyklus nicht mit den Jahreszeiten (abgesehen von den Abweichungen gegen den Mondlauf) übereinkommen, und es waren deshalb von Zeit zu Zeit Ausschaltungen notwendig. Die römischen Pontifices sollen diese Ausschaltung durch eine 24jährige oder 20jährige Periode bewerkstelligt haben; allein sie konnten damals (es handelt sich um das 6. und 5. Jahrhundert v. Chr.) eine solche noch nicht kennen, da ihr das $365^1/_4$tägige Jahr zugrunde liegt. Vielmehr haben sie sich durch willkürliche Schaltung fortgeholfen, indem sie einen Monat wegließen oder einschalteten, wenn die Abirrung gegen die Sonnenstände zu groß wurde. Um 191 v. Chr. scheint man die Regulierung der Schaltung verbessert zu haben, da die Abweichungen der überlieferten römischen Datierungen von den Jahreszeiten weniger regellos sind. Späterhin (etwa von 60 v. Chr. ab) befand sich aber die Zeitrechnung der Römer wieder in starker Verwirrung.

Reform durch Jul. Cäsar. Im Jahre 46 v. Chr. machte Julius Cäsar dem Wirrwarr ein Ende, indem er in dieses Jahr 90 Tage einschob (so daß es 445 Tage hatte), fernerhin aber die lunisolare Jahrform aufhob und an deren Stelle das $365^1/_4$tägige Sonnenjahr, mit Einschaltung eines Tages (im alten Schaltmonat Februar) alle vier Jahre, setzte. Die neue Periode (julianisches Jahr) bestand also aus drei Gemeinjahren zu 365 Tagen und einem Schaltjahre von 366 Tagen. Das Amtsjahr, d. h. das Jahr, welches an die Zeit geknüpft war, in welcher die Konsuln ihr Amt antreten sollten, war früher

1) s. Ginzel a. a. O. S. 249—253.

ziemlich schwankend und wurde erst 153 v. Chr. auf den 1. Januar fixiert; Julius Cäsar ließ bei seiner Reform den Anfang beider Jahre, des Amtsjahres und des bürgerlichen, auf den 1. Januar fallen. Die Monatslängen im 365tägigen Jahre setzte er in der Weise fest, wie wir sie noch jetzt in unserem Kalender haben (Januar 31, Februar 28, März 31, April 30 Tage usw.), indem er den früher 29tägigen Monaten Januar, August, Dezember je zwei Tage, den ebenfalls früher 29tägigen Monaten April, Juni, September, November je einen Tag hinzufügte, im ganzen also zehn Tage zum 355tägigen Jahre hinzusetzte. Die (anfänglich von den Pontifices mißverstandene) Schaltung kam übrigens erst im Jahre 8 n. Chr. in Ordnung.

Griechen. Betreffs der Griechen habe ich schon angegeben (S. 70 und 73), daß dieselben zu einem für die Regulierung ihres Lunisolarjahres brauchbaren Zyklus erst durch Meton (432 v. Chr.) gelangten. Diese 19jährige Periode fand aber nicht sogleich Anwendung in der Zeitrechnung. Die nähere Erforschung des Systems, welche Jahre des Zyklus als Schaltjahre behandelt wurden, in welcher Weise man die hohlen (29tägigen) und vollen (30tägigen) Monate aufeinanderfolgen ließ usw., ist erst in neuerer Zeit mit Hilfe des attischen Inschriftenmateriales gelungen. Die Griechen besaßen nämlich die löbliche Gewohnheit, ihre Staatsdekrete, die sie in Stein hauen ließen, genau zu datieren; dadurch haben diese Inschriften einen überaus hohen Wert für die Forschung erlangt. Wie sich herausstellt, wurde das 3., 6., 9., 12., 15., 17. und 19. Jahr des Zyklus als jedesmaliges Schaltjahr betrachtet, und man erreicht eine gute Übereinstimmung mit den Inschriften, wenn man den theoretischen Anfangspunkt des Zyklus auf das Jahr 433 v. Chr. verlegt. Von etwa 290 v. Chr. ab will die 19jährige Periode weniger befriedigend mit den überlieferten Daten stimmen, es scheint, daß um jene Zeit Änderungen in dem Zyklus vorgenommen worden sind. Als chronologisch dunkle Zeit gilt vorläufig noch das 2. und 1. Jahrhundert v. Chr., in welcher sich der Forschung beträchtliche Schwierigkeiten entgegenstellen, die hauptsächlich in der Unsicherheit der Regierungsjahre der attischen Archonten liegen. Das griechische Lunisolarjahr erhielt sich sehr lange, fast bis zum Aufhören des Archontats und bis zum Zusammenbruche des Heidentums (4. oder 5. Jahrhundert n. Chr.). Der Jahresbeginn des attischen Jahres lag, und zwar wohl seit ältester Zeit, im Hochsommer; die übrigen griechischen Staaten dagegen hatten sehr verschiedenen Jahranfang, Böotien, Delos, Elis mit dem Winter, Sparta, Ätolien mit dem Herbst.

Inder. Die Zeitrechnung der Inder ist uns betreffs der ältesten Periode nur durch die vedischen Texte bekannt, muß aber in jener Zeit noch sehr primitiv gewesen sein. Sonderbarerweise kennen die Veda nur ein Jahr von 360 Tagen; da ein solches weder solar noch lunisolar möglich ist, so müßte es (wenn es überhaupt existiert hat) durch willkürliche Schaltung mit den Jahreszeiten im Gleichgewicht gehalten worden sein. Andererseits geht aber die ganze spätere indische Zeitrechnung auf das Mondjahr zurück.

In den Texten der nachvedischen Zeit stellt sich das 360tägige Jahr als eine Periode zu Opferzwecken (savana-Jahr) heraus; neben diesem Jahre kennt man das Nakshatra-Jahr (siderisches Mondjahr, s. S. 71), das gewöhnliche Mondjahr von 354 Tagen und ein Sonnenjahr von 366 Tagen. Die Regulierung durch Schaltung war in dieser zweiten indischen Literaturperiode noch mangelhaft, aber es kommen doch schon Anfänge zur Bildung von Zyklen vor. In der dritten Periode (Siddhanta), in den ersten Jahrhunderten n. Chr., treten unvermittelt astronomische Grundlagen der Zeitrechnung auf, welche die Inder schwerlich aus eigenem Wissen geschaffen haben, wie die mit den Annahmen von Hipparch nahe übereinstimmenden Werte für die Längen des tropischen Sonnenjahres und des synodischen Mondmonats. Dagegen ist die weitere Entwicklung des indischen Lunisolarjahres mit Rücksicht auf Astrologie und Religion, unter Wahrung des eigenartigen indischen Gepräges erfolgt.

Chinesen.

Die lunisolare Jahrform der Chinesen hat mancherlei Wandlung durchgemacht, bevor sie die neuere Gestalt (im 17. Jahrhundert n. Chr.) erhielt. Daß die Kenntnis der $365\,^1/_4$tägigen Jahreslänge bei den Chinesen eine uralte sei, ist ein chronologisches Märchen, das seine Entstehung in der unbegrenzten und blinden Verehrung aller Tradition und in der Voraussetzung hoher Weisheit der Altvordern hat. Tatsächlich haben sich aber die Chinesen noch lange nach Christus, im Mittelalter, öfters mit ihrer Zeitrechnung in sehr arger Verwirrung befunden. Zu einer zyklischen Vorausberechnung der Neumonde sind sie durch viele Jahrhunderte hindurch nicht gelangt; erst im 6. oder 7. Jahrhundert n. Chr. lernten sie einige Elemente des Lunisolarjahres besser kennen, und die völlige Ordnung der Zeitrechnung erreichten sie durch fremde Hilfe (Jesuiten) im 17. Jahrhundert. Der Beginn des Lunisolarjahres richtet sich jetzt nach der Zeit, wann in das Zeichen der Fische (Februar oder Januar) der Neumond fällt; desgleichen die Schaltregel (Einschaltung eines Mondmonats) nach den Sonnenständen in der in 24 Teile (tsie-k'i) zerlegten Ekliptik. Die Jahre haben Längen von gewöhnlich 354, 355 oder 384 Tagen, selten 383 oder 385 Tage; die Monate fassen 29 und 30 Tage, jedoch nicht regelmäßig abwechselnd. In die chinesische Zeitrechnung haben auch indische Elemente, wie die Mondstationen und der zwölfjährige Jupiterzyklus, Eingang gefunden.

Babylonier.

Das alte Kulturvolk der Babylonier hatte bis zu seinem Verschwinden aus der Geschichte ein Lunisolarjahr, obgleich die Priesterastronomen (wenigstens in den letzten 300 Jahren v. Chr.) auch das Sonnenjahr gut kannten. Die Schaltung war sehr lange willkürlich, erst etwa um 534 v. Chr. war eine Oktaëteris in Gebrauch und um 381 v. Chr. ein 19jähriger Ausgleichszyklus mit sieben eingelegten Schaltjahren. Die Zeit des Jahrbeginnes scheint in der Periode des sehr alten Babylon nicht immer die gleiche geblieben zu sein, seit der Arsacidenzeit (3. Jahrhundert v. Chr.) lag der Jahresanfang im Frühjahre (Nisan).

Ägypter. Die Ägypter sind (von einigen Spuren alter Mondrechnung abgesehen) unter den sehr alten Völkern das einzige, welches kein Lunisolarjahr, sondern ein reines Sonnenjahr gehabt hat. Es hatte nur 365 Tage, war also ein Wandeljahr und durchlief nach und nach alle Jahreszeiten. Das Jahr setzte sich aus 12 Monaten zu 30 Tagen zusammen, fünf weitere sog. Epagomenen (Zusatztage) wurden angehängt; letztere lassen sich auf Denkmälern bis ins 4. oder 5. Jahrtausend v. Chr. zurückverfolgen. Wie sich durch Vergleichen überlieferter alter Festverzeichnisse mit späteren ergibt, verschob sich mit dem Wandeljahre ein großer Teil der Feste durch alle Jahreszeiten. Für die Bestimmung derjenigen Feste, welche an festen Jahrpunkten, mit der Sonne in Übereinstimmung, gefeiert werden mußten, fand man einen Ausweg durch die Beobachtung der Siriuserscheinungen. Die heliakischen Aufgänge des Sirius fielen, als Beobachtungsort ein und dieselbe Stadt vorausgesetzt, immer auf denselben Tag. Obwohl solche Beobachtungen schwierig sind und die Zeit des Wiedererscheinens des Sirius nur mit der Unsicherheit von einigen Tagen erkennen lassen, genügte das Verfahren für die Voraussage der Festtage. Nach und nach entdeckten die Priester, daß die Siriusaufgänge alle vier Jahre sich um einen Tag später verschoben, und sie schlossen hieraus, daß das Jahr um $^1/_4$ Tag größer sein müsse als 365 Tage. Im Jahre 238 v. Chr. ging man, wie ein uns erhalten gebliebenes Dekret (Inschrift von Kanopus) zeigt, zu dem festen $365^1/_4$tägigen Sonnenjahr über, jedoch erhielt sich im Volke das Wandeljahr bis in die Zeit des Kaisers Augustus.

Tageseinteilung. VI. Die übrigen Zeitelemente bei den Alten. Zu einer eigentlichen Einteilung des Tages in größere und kleinere Unterabteilungen sind die meisten Kulturvölker erst ziemlich spät, mit der Erfindung der Sonnen- und Wasseruhren, gekommen. Bei den Babyloniern scheint das Maß Kasbu, die Doppelstunde, d. h. $^1/_{12}$ des Tages, ziemlich alt zu sein.[1]) Merkwürdig genug, gebrauchen auch die Chinesen das System der Doppelstunden. Bis in die Zeit der Veda zurückreichend, ist die indische Teilung des Tages in 30 muhûrta. Die 24 Stundenteilung ist alt, da sie schon auf den ägyptischen Denkmälern vorkommt; es läßt sich aber nicht entscheiden, ob der Ursprung dieser Teilung ein ägyptischer, babylonischer oder überhaupt vorderasiatischer ist. Die im Abendlande, in Italien, Griechenland usw. aufgenommenen Stunden waren nicht gleich lang wie die unsrigen, sondern, da die Tageslänge und die Nachtlänge unabhängig voneinander in je 12 Teile geteilt wurden, mit der Jahreszeit an Länge verschieden. Diese sog. Temporalstunden haben sich durch das ganze Altertum, bis ins Mittelalter gehalten. Erst spät wurden sie durch die gleichlangen Stunden, eine Erfindung der griechischen und orientalischen Astronomen, verdrängt.

1) Die sexagesimale Tagesteilung bei den Babyloniern, $^1/_6$ Tag = 60 Zeitgrade, 1 Zeitgrad = 60 Zeitminuten, 1 Zeitminute = 60 Zeitsekunden, wurde nur von den Astronomen angewendet. Auch in astronomischen Schriften der Inder kommt sie vor.

Der Tagesanfang ist, da der größte Teil der alten Völker nach Lunisolarjahren rechnete, der Abend. Denn da der Monatsanfang an die Zeit des Erscheinens der ersten feinen Mondsichel (Neulicht), d. h. an den Abend geknüpft war, mußten folgerichtig alle anderen Tage vom Abend zu Abend gerechnet werden. Als „Abend" nahm man die Zeit des Sonnenunterganges, vielfach aber auch die Zeit der vorgeschrittenen Abenddämmerung. So zählten die Babylonier, Juden, Griechen und Inder den Tag von Abend zu Abend; die Ägypter dagegen (ihrem Sonnenjahr entsprechend) von der Morgendämmerung, ebenso die Inder in den Gegenden, wo das Sonnenjahr gebraucht wurde. Bei den Römern bildete sich aus der Berücksichtigung der Zeiten der Opferhandlungen[1]) die Gewohnheit aus, die Mitternacht als Tagesgrenze anzusehen. Der Tagesbeginn mit Mitternacht ging durch die Annahme des julianischen Jahres auch zu den christlichen Völkern über. Die Chinesen rechnen ebenfalls, aber nicht seit ältester Zeit, den Tag von Mitternacht zu Mitternacht. Tagesanfang.

Von Wochen kommen bei den Alten vor: die achttägige Nundinenwoche der Römer, die zehntägige der Ägypter, in einiger Beziehung auch die dekadische Zählung der Monatstage bei den Griechen, und die 60tägige der Chinesen nach einem zugleich für die Zählung der Monate und Jahre geltenden Sexagesimalsystem. Die siebentägige Woche ist nicht (wie man früher glaubte) direkt babylonischen Ursprungs. Eine solche von den Mondphasen unabhängig laufende Woche ist vielmehr bei den Babyloniern bis jetzt keilinschriftlich nicht nachweisbar gewesen. Es wird nur öfters ein fünftägiges Intervall (hamuštu) erwähnt, welches jedoch eine Art kaufmännischer (Zahl-)Termin war. Die siebentägige Woche ist wahrscheinlich in Vorderasien überhaupt, ohne daß man Babylonien oder Arabien den Vorzug geben kann, aus der Heiligkeit der Zahl sieben gebildet worden. Die Juden lernten frühzeitig die heilige Siebenzahl kennen; bei den Babyloniern fanden sie ein astrologisches siebentägiges Intervall vor, nach welchem Sühne- oder Bußzeiten angeordnet wurden. Als nun der Sabbat, der früher (vor der Einwanderung nach Kanaan) bloß der Tag der Volksversammlungen gewesen war, zum Tage der Verehrung Jahves erhoben wurde, nahmen die Ordner der jüdischen Religionssatzungen sich das babylonische Siebenintervall zum Muster und gründeten hierauf die siebentägige Woche. Die jüdische Woche fing erst in den letzten beiden Jahrhunderten v. Chr. an, im Abendlande bekannt zu werden; die Tage derselben hatten, da sie nur numeriert und nicht besonders bezeichnet wurden, keinen Zusammenhang mit den Namen der sieben Planeten. Mit der Verbreitung der Woche im Okzident drang der astrologische Aberglaube auch in die nunmehr von den Christen angenommene Woche ein, und die Tagesbezeichnungen nach den Planeten, dies Martis, dies Mercurii, dies Wochen. Entstehung der siebentägigen Woche.

1) Fielen die heiligen Handlungen in die erste Hälfte der Nacht, so wurden sie noch zum vorhergehenden Tage gezählt; fanden sie in der zweiten Nachthälfte statt, so gehörten sie schon zum nächsten Tage.

Iovis usw. wurden Mode[1]); diese Wochentagnamen erhielten sich bis ins Mittelalter und in den Sprachen der romanischen Völker zum Teil bis in unsere Zeit.

Monatsnamen. Die Monatsnamen sind auf sehr verschiedene Weise entstanden. Die Juden hatten anfänglich (etwa bis ins 1. Jahrtausend v. Chr.) phönizische Monatsnamen (Abîb, Siw, Bûl, Ethanîm), zählten aber weiterhin die Monate nur nach Ordnungszahlen (der erste, zweite Monat usw.). Nach der Rückkehr aus der babylonischen Verbannung (538 v. Chr.) kamen allmählich die Monatsnamen, welche die Juden in Babylonien kennen gelernt hatten und seitdem bis auf unsere Zeit gebrauchen (Nisan, Jjar, Siwan usw.), in Anwendung. Bei den Indern gehen die Monatsnamen auf die sehr alten Bezeichnungen zurück, welche man für die Zeit gewisser Opfer hatte, die dargebracht werden sollten, wenn sich der Mond in bestimmten Stellungen in den Mondhäusern (Nakshatra, s. S. 71) befand. Aus diesen Bezeichnungen wurden 12 für die Mondmonate ausgewählt, später übertrug man sie ohne Änderung auch auf die Monate des Sonnenjahres. Die Römer hatten in der ältesten Zeit nur zehn Monatsnamen, von denen die sechs letzten (Quintilis, Sextilis, September usw.) Ordnungszahlen waren. Nach den Ordnungszahlen (der erste, zweite, ...) zählte ein Teil der griechischen Staaten die Monate. Die Chinesen zählen ihre Monate noch jetzt so, in der alten Zeit benannten sie die Monate nach den zwölf tschi (den Charakteren, welche eine Grundlage ihres Sexagesimalsystems bilden). Die ägyptischen Monatsnamen stammen von den Namen der Gottheiten her, deren Feste in die verschiedenen Monate fielen; in ähnlicher Weise nach Götterfesten wurden einzelne Monate von griechischen Stämmen benannt.

Monatstage. Die Monatstage werden bei den Alten meist durch die Ordnungszahlen angegeben, bei den alten Persern und den Ägyptern der Spätzeit finden sich Bezeichnungen der 30 Monatstage nach Genien oder Gottheiten. Die besondere Zählweise der Tage bei den Griechen und Römern habe ich schon erwähnt.

Mängel in der ersten Jahrzählung. Um das Jahr anzugeben, in welches irgendein Ereignis fiel, welches man also bezeichnen wollte, hatte man in den alten Zeiten noch keine Ära, d. h. keine von einem festen Ausgangspunkte anfangende Zählung der Jahre. Dem wenig entwickelten Zeitsinne genügte die Zählung nach Jahren der Könige, nach bemerkenswerten Vorfällen, Regierungshandlungen u. dgl. Solche Zählweise tritt uns z. B. massenhaft auf den Tontafeln der Babylonier entgegen: „das Jahr, wo das Fundament des Tempels des Nin-ib gelegt wurde“, oder „das Jahr, wo der König von Ur die Mauer des Westens erbaute“; desgleichen in der Bibel: „Zwei Jahre vor dem Erdbeben“ oder „Im Todesjahr des Königs Uzia“ usw. Besser wurde die Bestimmung der Jahre, als man sie an die Regierungsjahre der Könige,

1) Als ältesten Nachweis der Planetenwoche im Abendlande nimmt man die Erwähnung des Saturntages bei Tibullus (1. Jahrhundert v. Chr.) an. In einer Wandinschrift aus Pompeji werden die sieben Planetentage vollständig aufgezählt (d. h. um 79 n. Chr.).

der Konsuln, der Archonten anschloß; Anfänge zur Sammlung von Verzeichnissen der aufeinanderfolgenden Könige bemerken wir schon bei den Babyloniern.

Datierung nach Konsuln.

Aufzeichnungen über die römischen Konsuln (die Amtsdauer der letzteren sollte normal ein Jahr sein) wurden in Rom schon früh geführt; aber erst seit dem 3. Jahrhundert v. Chr., nachdem die Konsulnverzeichnisse offiziell berichtigt und zusammengestellt waren, bildete sich im Römerreiche die Gewohnheit aus, nach den Jahren der Konsuln zu datieren. Diese unbequeme und vermöge des zeitlichen Schwankens der römischen Amtsjahre unsichere Art der Datierung wurde im 1. Jahrhundert v. Chr. von Varro durch eine Ära ersetzt. Letzterer ging mit Hilfe der erwähnten Konsulnverzeichnisse und der Liste über die Könige (Rom wurde erst 509 v. Chr. Republik) bis auf das mutmaßliche Jahr der Gründung Roms zurück und zählte von diesem (753 v. Chr.) die Jahre. Die Athener datierten ihre Dekrete, Erlässe usw. nach dem Jahre des jeweiligen regierenden Archon; die von den Schriftstellern eingeführte Zählung nach solchen Archontenjahren wurde aber erst durch späte Historiographen, insbesonders durch ihre vom 5. bis zum Ende des 3. Jahrhunderts v. Chr. reichenden Archontenlisten möglich. Eine sehr bemerkenswerte Festigkeit und Brauchbarkeit haben bei den Chinesen (und Japanern) die seit alter Zeit fortgeführten Listen über die Regierungsjahre der Kaiser erlangt. Man verbindet diese Jahre mit den 60 Jahren eines vom ältesten Kaiser (Hoang-ti 2697 v. Chr.) an laufenden Sexagesimalzyklus und erhält so eine unzweideutige Datierungsweise. In Indien haben sich, allerdings erst spät, verschiedene solche Jahreszählungen nach einheimischen Königen und Fürstengeschlechtern ausgebildet, von denen namentlich die Sakaära (mit 78 n. Chr. anfangend) eine weite, über Hinterindien, Sumatra, Java und die benachbarten Inseln reichende Verbreitung erlangt hat. Eine ebenfalls auf die Zeit der Regenten, und zwar auf die Jahre ihres Regierungsantritts basierte Ära war die Nabonassarische, so genannt, weil der König Nabonassar im Kanon des Ptolemaios der zuerst genannte ist und von seinem Jahre (747 v. Chr.) die Zählung ausgeht. Die Ära bildete sich im Abendlande im 2. Jahrhundert n. Chr. und ist eine bloße Gelehrtenära, d. h. sie wurde im bürgerlichen Leben nicht gebraucht, sondern nur von den Geschichtschreibern und Chronisten angewendet. Desgleichen ist die sog. Olympiadenära, die Jahreszählung nach den alle vier Jahre stattfindenden Olympischen Spielen, nur eine Ära der Gelehrten geblieben. Erst seit dem 1. Jahrhundert v. Chr. wurde auch im bürgerlichen Leben der Gebrauch von Ären zur Zählung der Jahre lebhafter; eine dieser Ären war die alexandrinische, nach welcher öfters ägyptische Papyri (Verträge, Rechnungen usw.) datieren; weit größere Verbreitung erlangte die diokletianische Ära, welche, wie leicht sichtbar, an das erste Regierungsjahr des Kaisers Diokletian (284 n. Chr.) geknüpft war. Im Orient speziell verbreitete sich seit dem 3. Jahrhundert v. Chr. ziemlich weit die seleukidische

Nach Archonten.

Kaiserjahre.

Ära des Nabonassar.

Olympiaden.

Erste Ären.

Ära. Die Juden verwendeten diese Ära lange Zeit; einige andere jüdische Jahreszählungen (wie nach „Jahren des Exils", des Hohenpriesters Simon, einigen Besonderheiten der Makkabäerbücher) hatten nur vorübergehende Bedeutung. Zu ihrer jetzigen Weltära (Zählung von 3761 v. Chr. an) gelangten die Juden erst im Mittelalter. Letztere Ära ist künstlich auf die angebliche Epoche der Weltschöpfung zurückberechnet; ähnlich gingen die Inder mit ihrer Kaliyuga auf eine allgemeine Konjunktion der Planeten (3102 v. Chr.) zurück.

Größere Jahreszyklen der Alten.

Von den Zeitkreisen oder Zyklen des Altertums, deren man sich bediente, um die erkannte oder vermeintliche Wiederkehr von Erscheinungen in Jahren auszudrücken, seien hier noch die ägyptischen, die Han-, Sed-, Apis-, Phönix- und Sothisperiode, und die indischen Jupiterzyklen erwähnt. Die Hanperiode bedeutete wahrscheinlich nur große Zeiträume im allgemeinen, die 30jährige Sedperiode die Wiederkehr irgendeines königlichen Jubiläumstages, das Wesen der Apis- und Phönixperiode ist trotz vielfältiger Deutung dunkel geblieben, beide beziehen sich aber wahrscheinlich auf die naturphilosophischen Vorstellungen der Ägypter. Die Sothisperiode endlich, 1460 Jahre fassend, ist aus der Verschiebung der jährlichen heliakischen Aufgänge des Sirius gegen das 365tägige Wandeljahr (s. S. 70) berechnet worden; nach 1460 Jahren fällt nämlich der Sothisaufgang wieder mit dem Anfang des Wandeljahres zusammen. Alle diese Zyklen sind, vielleicht mit Ausnahme des Apiszyklus, ziemlich spät entstanden und haben nicht zum Inventar der praktischen Chronologie gehört. Die indischen Jupiterzyklen, der 60jährige und der 12jährige, bilden dagegen einen Teil der indischen Zeitrechnung. Man benutzte die siderische Bewegung des Planeten Jupiter, vermöge welcher letzterer alle 12 Jahre in dieselben Stellungen am Sternhimmel gelangt, zum Aufbau von Jupiterjahren und -zyklen und zählte die Jahre danach. Der Gebrauch dieser Zyklen läßt sich bis in die Siddhantazeit zurückverfolgen.

Die altjüdischen Zyklen, das Erlaßjahr, Sabbatjahr, Jobeljahr, sind weniger technische Zeitkreise als vielmehr volkswirtschaftliche Perioden gewesen. Die erstgenannte Periode, sieben Jahre fassend, und das Jahr der Freilassung, bezog sich auf zeitweisen Schuldennachlaß bzw. auf Freisetzung der Sklaven. Durch das Sabbatjahr sollte dem Ackerbau geholfen werden, indem alle sieben Jahre der bewirtschaftete Boden im letzten Jahre unbebaut gelassen werden sollte, um der Natur eine Erholungszeit (Sabbatjahr) zu gönnen. Aus der Unmöglichkeit, alle diese Zyklen einhalten zu können, entstand später, in der nachexilischen Neuordnung der Gesetzgebung, die 50jährige Jobelperiode, welche auf Erleichterung der alten Vorschriften hinzielte.

Teilweiser Übergang des cäsarischen Jahres in das Mittelalter.

VII. Das Mittelalter. Wie wir gesehen haben, gingen mit der Annahme des von Cäsar begründeten julianischen Jahres durch die Christen auch die übrigen Einrichtungen dieser Jahrform — die wiederum im alt-

römischen Jahre ihre Wurzeln haben — in das Spätaltertum und in das Mittelalter über: die teilweise Benennung der Monate nach Ordnungszahlen (September, Oktober usw.), die ungleiche Länge der Monate, der Februar als Schaltmonat, die Lage des Schalttages in letzterem und der Jahresanfang mit 1. Januar. Alle diese Dinge sind also nicht mittelalterliche Willkür, sondern beruhen auf der historischen Entwicklung unserer Zeitrechnung. — Der Übergang erfolgte selbstverständlich nur langsam und drang nicht in allen seinen Teilen durch, sondern vermochte nationale Eigentümlichkeiten nicht ganz zu verdrängen. Betreffs der Monatsnamen führte Karl der Große bei den Germanen, welche vielfältige eigene Monatsnamen hatten, die auf das monatliche Klima deutenden Namen Hornung, Ostermonat, Brachmonat usw. ein, von welchen sich noch bis jetzt manche erhalten haben. Die nordländischen (skandinavischen) und angelsächsischen (britischen) einheimischen Namen erhielten sich ziemlich lange gegen die römischen, und bei verschiedenen slawischen Nationen haben die letzteren bis jetzt überhaupt keinen Eingang gefunden. Besonders zersplittert war im Mittelalter die Zeit des Jahresanfanges, denn es gab nicht selten in ein und demselben Lande mehrere Arten desselben, obendrein im Laufe der Zeit wechselnd. Besonders stark verbreitet war der Jahresanfang mit dem Tage der Menschwerdung Christi, nämlich mit dem Weihnachtstage, 25. Dezember (Italien, England, Frankreich usw.), oder mit dem Marientage (Verkündigung Mariä 25. März), besonders gefördert durch den Marienkultus in Italien und Frankreich. Bei den Franken und Alemanen wurde das Jahr mit dem 1. März angefangen (anlehnend an das kirchliche Nisanjahr der Juden); die Republik Venedig rechnete immer danach, die Russen seit der Einführung des Christentums bei ihnen. Auch von Ostern ab wurde das Jahr gerechnet (Paschalstil, am meisten in Frankreich). Im oströmischen Reiche (Balkanstaaten) fing man das Jahr mit dem 1. September an, desgleichen bei den Russen seit dem 13. Jahrhundert. Der Jahresanfang mit 1. Januar hielt sich, gedrängt durch die andern Rechnungen, ziemlich notdürftig, um so mehr als er in den ersten Jahrhunderten nach dem Siege des Christentums als ein römisch-heidnischer angesehen wurde; erst seit dem 13. Jahrhundert kam er in stärkere Aufnahme, und mit dem 16. Jahrhundert erlangte er in den europäischen Staaten das Übergewicht. Am spätesten wurde der Jahresbeginn mit 1. Januar in der Republik Venedig eingeführt (1797). Die Kenntnis dieser verschiedenen Jahresanfänge (Stile) ist für den heutigen Historiker sehr wichtig, da er danach die vorkommenden Daten (z. B. in Urkunden) zu beurteilen hat.

Neue Monatsnamen.

Mittelalterliche Jahresanfänge.

Seit dem Aufhören des römischen Konsulats — welch letzteres beim Datieren als Ersatz für den Mangel eines festen Ausgangspunktes der Jahrzählung gedient hatte — besaß das Mittelalter keine Ära. Man begnügte sich hie und da mit der Jahreszählung nach Regierungsjahren der Kaiser, Päpste und Bischöfe; die Päpste selbst zählten öfters nach ihren Pontifikatsjahren. Dieser Mangel der Zeitrechnung, der durch die vielfache

Verschiedenheit des Jahresbeginnes noch gesteigert wurde, bestimmte
Weltären. mehrere Chronographen, Weltären aufzustellen, d. h. Jahreszählungen, welche von einem fingierten Jahre der Weltschöpfung (das mit verschiedenen Hilfsmitteln berechnet wurde) aus zählen. Solche Weltären entstanden schon im 3. und 4. Jahrhundert n. Chr., wie die von Julius Africanus (Epoche derselben das Jahr 5502 v. Chr.), jene des Panodoros, auch die alexandrinische genannt (Epoche 5493 v. Chr.), sowie die antiochenische (Epoche 5969 v. Chr.). In den Besitz eines besseren Hilfsmittels kam das
Indiktionen. Mittelalter, als man, und zwar seit dem 4. Jahrhundert, die Indiktionen zur Jahreszählung benutzte. Die Indiktion (Römerzinszahl) gibt an, das wievielte Jahr in einem 15jährigen fortlaufenden Zyklus ein gegebenes ist. Der Ursprung der Indiktionen ist nicht völlig aufgeklärt, jedenfalls führt er aber auf Ägypten. Wahrscheinlich entstand der 15jährige Indiktionenzyklus aus 5jährigen Schatzungsperioden, die der Besteuerung zugrunde gelegt wurden; die Schatzungen sind vielleicht von Diokletian eingeführt. Das Steuerjahr begann in Ägypten mit dem September. Davon schreibt sich wahrscheinlich der Gebrauch her, daß man im byzantinischen Reiche die Indiktion mit 1. September anfangen ließ (griechische Indiktion), während in England, Frankreich und Italien der 24. September dafür gebräuchlich wurde (Bedas Indiktion); die römische (päpstliche) Indiktion stellte man auf den 25. Dezember oder 1. Januar. Im Zusammenhange mit der im Oriente gebrauchten Indiktion steht die Ausbildung einer neuen
Byzantinische Weltära. Ära, der byzantinischen Weltära, die im 7. Jahrhundert aufkam. Sie beginnt mit 1. September 5509 v. Chr. und gab dem julianischen Jahre, da die byzantinischen Weltjahre wie die julianischen eingerichtet sind, erst einen festen Ausgangspunkt. Mit dem Sturze des byzantinischen Reiches verfiel diese vorzügliche Ära und machte der mohammedanischen und christlichen Platz. Der Urheber der letztgenannten Ära, der christ-
Ära der Geburt Christi. lichen oder der Jahreszählung nach Christi Geburt, ist der römische Abt Dionysius Exiguus (um 525 n. Chr.). In dessen zur Entnahme der Daten des Osterfestes bestimmten Tafeln findet sich zum ersten Male die Rechnung nach Jahren „anno domini Jesu Christi“, bei welcher Dionysius das 248. Jahr der Diokletianischen Ära dem 532. nach der Geburt Christi gleichgesetzt hat. Durch die Ostertafeln des Dionysius, welche im Mittelalter bedeutendes Ansehen genossen, verbreitete sich die Zählweise nach Jahren Christi unter den Chronographen. Der eigentliche Ausgangspunkt der Ära, welche schließlich die meisten andern bei den mit julianischen Jahren rechnenden Völkern verdrängt hat, aber war England. Im 7. Jahrhundert wurden die angelsächsischen Urkunden schon nach der christlichen Ära datiert, und bald griff dieser Gebrauch nach Frankreich über. Die Päpste benutzten die Ära seit dem 1. Jahrtausend, durch die Kreuzzüge wurde sie im Oriente bekannt. Während des Mittelalters hat sie nur in Spanien nicht Eingang gefunden, da dort seit dem 5. Jahrhundert eine einheimische Ära in Gebrauch stand. Der Ausgangspunkt des Dionysius,

das angenommene Jahr der Geburt Christi, ist gegen das wirkliche wahrscheinlich um einige Jahre fehlerhaft; man hat sich im Mittelalter (und selbst in neuerer Zeit) viel damit den Kopf zerbrochen, den Fehler zu berichtigen, obwohl die uns zur Verfügung stehenden Hilfsmittel dabei versagen.

Die 1582 erfolgte Reform des julianischen Kalenders ist in ihren letzten Gründen auf die Frage zurückzuführen, wann das Osterfest zu feiern sei. Die Juden feierten das Passahfest, das für sie die Bedeutung eines Sühnefestes hatte, im ersten Frühjahrsmonate, dem Nisan, und sie trachteten, diesen Monat immer in die Nähe des Frühlingsäquinoktiums zu legen, damit am Feste die entsprechenden Früjahrsopfergaben dargebracht werden konnten. Der Festtag war der 14. Nisan, d. h. da bei den mit Mondjahren rechnenden Völkern die Vollmonde auf die Mitte (14. oder 15. Tag) der Mondmonate fallen, ein Vollmondtag. Ostern, der Tag der Auferstehung Christi, liegt am Ende der Passahwoche. Die Christengemeinden, welche aus dem Judentume hervorgegangen waren (in Palästina, Syrien, Kleinasien), feierten ihrer alten Gewohnheit zufolge das Osterfest gleichzeitig mit den Juden, am 14., 15. und 16. Nisan. Bei den abendländischen (römischen, alexandrinischen) Christen dagegen war aus dem anfänglich nur zu Versammlungen und christlichen Erbauungen bestimmten Sonntage ein geheiligter Tag, der „Tag des Herrn“ geworden. Bei diesen wurde daher auch bald der Gebrauch üblich, Ostern auf den Sonntag zu legen. Die über die Verschiedenheit der Osterfeier ausgebrochenen Streitigkeiten konnten auf mehreren Konzilen nicht beigelegt werden. Endlich wurde auf dem Konzil von Nikäa (325), wenn auch nicht dekretiert, so doch als Regel aufgestellt, Ostern sei nicht gleichzeitig mit den Juden zu feiern, sondern am Sonntage nach dem ersten Vollmonde des Frühlings. Man glaubte damals noch, das Frühlingsäquinoktium verharre auf ein und demselben Tage, dem 21. März. Es bildete sich so die Regel aus, Ostern auf den Sonntag nach dem Vollmonde zu setzen, der nach dem 21. März eintritt, oder um eine Woche zu verschieben, falls der Frühlingsvollmond selbst auf den Sonntag gefallen war. Um sich ganz von der jüdischen Bestimmung der Vollmonde unabhängig zu machen, fing man (im 3. Jahrhundert) an, Ostertafeln zu konstruieren, d. h. mittelst einer als zyklisch vorausgesetzten Bewegung des Mondes die Vollmonde zur Osternbestimmung vorauszuberechnen. Solche Ostertafeln sind von den Komputisten der orientalischen und abendländischen christlichen Kirche eine ganze Reihe verfaßt worden. Die einen benutzten dabei die griechische Oktaëteris oder den Metonschen 19jährigen Zyklus, andere kombinierten die Sonnen- und Mondbewegung zu größeren (84 und 532jährigen) Perioden. Da diese Zyklen („Mondzirkel“) der komplizierten Mondbewegung nur ungefähr gerecht werden, so wichen die berechneten Tage der Vollmonde gegen die wirklichen mitunter ziemlich ab. Aus den Ostertafeln selbst und aus der Uneinigkeit der römischen und alexandrinischen

Datum des Osterfestes.

Kirchenregel betr. des Osterfestes.

Ostertafeln.

Kirche darüber, wieweit sich die „Ostergrenzen“ (der früheste und späteste Ostertermin) zu erstrecken hätten, erwuchsen bald neue und langwierige Streitigkeiten. Erst in der Zeit Karls des Großen war so weit Übereinstimmung erreicht, daß man Ostern allgemein nach dem alexandrinischen Osterkanon ansetzte.

Fehler der Ostertafeln.

Allein nicht bloß die „Mondzirkel“ der Ostertafeln waren fehlerhaft, sondern auch die Länge des julianischen Jahres von 365 Tagen 6 Stunden. Der Fehler des letzteren gegen das tropische Jahr betrug 11 Minuten 14 Sekunden, außerdem ergab sich in einem 19jährigen Mondzirkel 1 Stunde 28,7 Minuten[1]) Verkürzung. Die Kalendertage des julianischen Jahres verschoben sich daher im Laufe der Zeit weiter in das tropische Jahr, die Differenz ihrer Stellung gegen einen Jahrpunkt, wie den Tag des Frühjahräquinoktiums (21. März), nahm zu, und die berechneten Vollmonde des julianischen Kalenders fielen später als die wirklichen, im 16. Jahrhundert bereits um drei bis vier Tage abirrend. Wegen dieser beiden Übelstände wurde die Frage nach einer Reform der Osterberechnung dringlich. Man hatte das Sonnenjahr so zu ordnen, daß das Frühjahrsäquinoktium wieder auf den 21. März zurückkam, und die zyklische Berechnung der Vollmonde so, daß fernerhin eine bessere Übereinstimmung der letzteren mit den wirklich stattfindenden garantiert wurde.

Gregorianische Kalenderreform.

Erst nach vielfältigen Vorschlägen und Verhandlungen auf Konzilen während des 14. und 15. Jahrhunderts wurde durch eine 1576 vom Papst Gregor XIII einberufene Kommission die Reform ausgeführt. Auf ein päpstliches Dekret hin wurden 1582 im Monat Oktober zehn Kalendertage weggelassen und statt des 5. der 15. Oktober datiert. Durch diese gregorianische Reform wurde die Differenz gegen das Frühlingsäquinoktium beseitigt. Ferner wurde bestimmt, daß man, um der Jahreslänge von 365 Tagen 5 Stunden 48 Minuten zu genügen, wie bisher drei Gemeinjahre zu 365 Tagen und jedes vierte als Schaltjahr zu 366 Tagen anzunehmen, jedoch die Säkularjahre (wie 1700, 1800, 1900) als gemeine Jahre zu betrachten habe, mit Ausnahme derjenigen Säkularjahre, deren Zahlen durch 400 teilbar sind, wie 1600, 2000, 2400, 2800; diese sollten Schaltjahre sein. Hiernach enthalten also 400 gregorianische Jahre 146097 Tage, so daß die mittlere Länge eines gregorianischen Jahres 365,2425 Tage beträgt, die nur noch um 0,00030 Tage oder 26 Sekunden von der wahren Länge des tropischen Jahres abweicht.

Neue Epakten.

In Beziehung auf die Berechnung der Ostervollmonde akzeptierte man den von Aloisius Lilius vorgeschlagenen Epaktenzyklus. Es würde überflüssig sein, dem Leser das mittelalterliche Rüstzeug zur Bestimmung des Osterfestes, die Epakten, Sonntagsbuchstaben, Goldenen Zahlen und die Ostergrenzen mit ihren Tafeln vorzuführen; wir besitzen jetzt Hilfsmittel,

1) 19 julianische Jahre = 6939 Tage 18 Stunden; ein Mondzirkel (235 Mondmonate) hat 6939,6884 = 6939 Tage 16 Stunden 31,3 Minuten, also die Differenz beider 1 Stunde 28,7 Minuten.

welche das Datum des Osterfestes auf die einfachste Weise[1]) ermitteln lassen, und Sammlungen, welche sie berechnet enthalten.[2]) Wichtiger ist hier die Hindeutung, daß durch die gregorianische Kalenderreform nicht alle angestrebten Ziele vollständig erreicht worden sind. Die Schaltung ist gut durchgeführt; der Fehler, der durch dieselbe in der Länge des tropischen Jahres übrigbleibt, beträgt in 400 Jahren etwa 2 Stunden 50 Minuten, kann also erst in 3400 Jahren zu einem Tage anwachsen, und das Sonnenjahr, nach welchem wir rechnen, läuft also recht befriedigend mit der Sonne. Dagegen ist durch die neu eingeführte Epaktenrechnung nicht bewirkt worden, daß Ostern immer auf die vom Konzil von Nikäa geforderten Tage fällt; auch lassen sich in historisch-chronologischer Beziehung einige Einwände machen, deren Auseinandersetzung aber hier zu weit führen würde.

Annahme und Ablehnung des gregorianischen Kalenders.

Die Einführung des neuen Kalenders erfolgte nur in Westeuropa ziemlich rasch, stieß aber, da man den päpstlichen Kalender nicht annehmen wollte, namentlich in Deutschland und der Schweiz auf heftigen Widerstand. Es wurden verschiedene Verbesserungsvorschläge gemacht und zum Teil in die Praxis übersetzt, wodurch die Kalenderverwirrung (wie z. B. in Schweden) nur noch gesteigert ward. Erst von etwa 1700 an nahmen allmählich auch die übrigen Staaten den gregorianischen Kalender an (zuletzt der schweizerische Kanton Graubünden). Die Oststaaten Europas, wie Rußland und die Balkanländer, deren Bewohner größtenteils der griechischen Kirche angehören, sind bei dem julianischen Kalender verblieben. Die Datierung nach dem letzteren (auch der alte Stil genannt) ist gegen die gregorianische (neuer Stil) jetzt schon um 13 Tage zurück.

Mohammeds freies Mondjahr.

In das Mittelalter gehört schließlich noch die sonderbare Erscheinung der mohammedanischen Zeitrechnung. Als Epoche derselben wurde von den Anhängern des Religionsstifters Mohammed das Jahr der Flucht und das Datum 15. Juli 622 n. Chr. gewählt. Die Jahrform ging aus dem altarabischen, noch sehr primitiven Mondjahre hervor. Mohammed hob das Nâsi, d. h. das Einschalten von Monaten (um das Mondjahr mit den Jahreszeiten in Übereinstimmung zu bringen) auf, entweder weil er den Zweck nicht verstand, oder weil die Einschaltung unregelmäßig gehandhabt wurde. Dadurch wurde das Mondjahr zu einem freien, nur den Mondphasen folgenden Jahre. Das mohammedanische Jahr läuft also, da es nur 354 oder 355 Tage hat, mit seinem Anfange durch alle Jahreszeiten und wird nur zur Erhaltung der Übereinstimmung mit den Mondphasen durch

---

1) Zu empfehlen sind die kalendariographischen und chronologischen Tafeln von R. Schram, Leipzig 1908. Man findet dort das Osterdatum ohne jede Rechnung mittelst der „Kalenderzahl", z. B. Seite 81 für das Jahr 1931 n. Chr. Kalenderzahl 15 und damit Seite 100 sofort das Datum 5. April.

2) Eine solche Sammlung aller Osterfeste von 600 bis 2000 n. Chr. julianisch, und 1583 bis 2000 gregorianisch findet man bei F. Rühl, Chronologie des Mittelalters und der Neuzeit, Berlin 1897, S. 277—294.

einen 30jährigen bzw. 8jährigen Zyklus korrigiert. Obwohl chronologisch widersinnig, ist die Jahrform von dem Siegeszuge des Mohammedanismus bis nach Indien und den Sundainseln, nach Europa, Nord- und Innerafrika, selbst bis Madagaskar verschleppt worden.

Jahr der französischen Republik.

VIII. Die Neuzeit. Die erste französische Republik brachte in ihrem Bestreben, mit der geheiligten Tradition überall gründlich aufzuräumen, auch eine kurzlebige Kalenderreform zuwege. 1793 ging der Konvent auf die Jahrform von 12 Monaten zu 30 Tagen und den 5 angehängten Epagomenen, d. h. auf das ägyptische Jahr, zurück. Die 7tägige Woche wurde abgeschafft, dafür jeder Monat in drei 10tägige Intervalle zerlegt; für die Tagesteilung sollte das Dezimalsystem (10 Stunden, 1 Stunde = 10 Minuten usw.) angewendet werden. Die Jahre begannen mit dem Herbstäquinoktium (das erste Jahr mit 22. September 1792), dessen Eintritt alljährlich astronomisch genau zu bestimmen war, Schaltungssysteme gab es nicht mehr. Die neue Jahrform verschwand so schnell (1805), wie sie gekommen war, am ehesten die 10tägige Woche und der 10stündige Tag.

Stellung Rußlands zur Kalenderreform.

In Rußland, das jetzt mit seinem julianischen Kalender um 13 Tage gegen das Sonnenjahr zurück ist, wurde 1899 durch eine Kommission die Frage über die Kalenderreform beraten.[1]) Zu definitiven Beschlüssen ist es nicht gekommen; die Annahme des gregorianischen Kalenders wurde in Anbetracht der angeblichen Unvollkommenheit desselben für Rußland abgelehnt und die Ausarbeitung eines „besseren" beschlossen. Von diesem „besseren" hat man aber bis heute nichts mehr gehört.

Gegenwärtig[2]) beschäftigen zwei Reformprojekte die verbessernde Welt: die Frage der Festlegung des Osterfestes und die Abänderung der inneren Einrichtungen des gregorianischen Jahres. Beide Fragen sind schon auf dem vorerwähnten russischen Kongreß zur Sprache gekommen.

Festlegung des Osterfestes.

Nach den Vorschriften des gregorianischen Kalenders kann Ostern zwischen dem 22. März bis 25. April gefeiert werden (das jüdische Passah hat eine sehr ähnliche Spielweite). Diese von Jahr zu Jahr starken Schwankungen des Festes bewirken unstreitig im öffentlichen Leben unliebsame Störungen, namentlich für die Handelswelt. Es sind daher Bestrebungen in Gang gekommen, welche die jetzt so starke Schwankung des Ostertages erheblich beschränken wollen. In Deutschland hat 1909 der Handwerk- und Gewerbekammertag beim Reichstag um Einleitung internationaler Verhandlungen petitioniert, nach welchen die Schwankungen des Osterfestes künftighin auf die Zeit zwischen dem 4. bis 11. April zu beschränken wären. Im Juni 1910 hat der Deutsche Hansabund auf dem internationalen

1) Schon früher, 1829, 1837, 1858, sind in Rußland Stimmen für und gegen die Annahme des gregorianischen Kalenders aufgetaucht; 1863 erfolgte der Vorschlag Mädlers zu einer selbständigen Reform des julianischen Kalenders.

2) Zwei andere Fortschritte in der neueren Zeitrechnung, die Einführung der mittleren Zeit und der Zonenzeit, werden im III. Abschnitte des Buches besprochen.

Handelskammerkongreß zu London das Projekt befürwortet, Ostern auf den ersten Sonntag nach dem 4. April festzulegen. Andere Vorschläge plädieren für den 1. oder 2. April. Die Osternfixierung würde selbstverständlich dem Feste seinen bisherigen Charakter als den eines Frühlingsmondfestes vollständig nehmen, weil dann Ostern ganz unabhängig von den Vollmonden sein würde. Da die gregorianische Osternberechnung, wie oben bemerkt wurde, eine vollständige Übereinstimmung der Ostervollmonde mit den tatsächlichen doch nicht erreicht, so wird die Ablösung des Festes vom Mondjahre leicht verschmerzt werden können. Den Fehler, den die bisherige Rechnung begeht, daß bisweilen jüdisches Passah und christliche Ostern auf ein und denselben Sonntag zusammenfallen[1]), kann auch die Reform nicht beheben. Wie sich zu der letzteren die Vertreter der katholischen Kirche, der protestantischen und anderweitigen christlichen Bekenntnisse verhalten werden, ist derzeit noch nicht bekannt. Die Sache gehört um so mehr zu den Erwägungen der Kirche, da auch das Datum der sog. beweglichen Feste von der Lage des Ostertages abhängt.

Projekte zu Veränderungen der inneren Einrichtung des Jahres.

Im Zusammenhange mit der Osternfixierung stehen Veränderungen, die am 365tägigen Jahre vorgenommen werden sollen, und für welche in den letzten Jahren eine Unzahl Reformatoren mit den verschiedensten, nicht selten absonderlichsten Vorschlägen eingetreten sind. Den meisten ist die jetzige ungleiche Länge der Monate (sieben zu 31 Tagen, vier zu 30, einer zu 28 Tagen) ein Dorn im Auge und das Fallen der Wochentage auf verschiedene Datums während der Jahre. Englische und französische Vorschläge wollen das Jahr in 13 Monate zu 28 Tagen oder in 51 siebentägige und eine achttägige Woche zerlegen; ein Reformator denkt an 73 fünftägige Wochen im Jahre, so daß sechs solcher Wochen je einen 30tägigen Monat bilden, mit der letzten (73.) Woche als einer Art Festwoche u. dgl. Mehr Rücksicht auf die uralte siebentägige Woche nehmen andere Reformatoren, welche das Jahr so einrichten wollen, daß es nicht nur immer am selben Wochentage (Sonntag, andere Montag) beginnt, sondern daß auch alle Jahrestage, jahraus, jahrein, auf die nämlichen Wochentage fallen.[2]) Die Einrichtungen, welche in dieser Beziehung (von G. Armelin, Grosclaude, J. Bach, Sichart, L. Günther, Kampe, W. Köppen u. a.) vorgeschlagen sind, ändern dementsprechend die Länge der Monate, so daß nur 30 und 31tägige Monate (und meist 91tägige Quartale) entstehen. Der Schalttag soll entweder in die Mitte oder an das Ende des Jahres gesetzt werden. Manche gehen noch weiter und wollen den Jahresanfang auf den 21. März verlegen (Ssaladilow, Flammarion). Die gregorianische Schaltregel

Neue Monatslängen.

Neuer Jahresanfang.

1) Der erste Passahtag (Passah wird an zwei aufeinanderfolgenden Tagen gefeiert) fiel auf Sonntag und zugleich auf den gregorianischen Ostertag z. B. am 3. April 1825 und am 12. April 1903; fernerhin wird dies (bis 2000 n. Chr.) der Fall sein am 1. April 1923, 17. April 1927, 18. April 1954 und 19. April 1981.

2) Dies erreicht übrigens auch der 28jährige gregorianische Sonnenzirkel innerhalb 28 Jahren.

scheint man beibehalten zu wollen, obwohl bei dem sonst radikalen Vorgehen der Reform die Einführung von 31 Schaltjahren in je 128 Jahren der mittleren Jahreslänge rein theoretisch zutreffender[1]) sein würde. Ob die Reform derzeit schon Aussichten auf Verwirklichung hat, möchte zu bezweifeln sein. Zu den vorhandenen beiden Stilen, alter und neuer Stil, würde noch ein dritter kommen. Während der „alte Stil" bei uns mehr nur für die Handelswelt in Betracht kommt, würde der dritte, der „neuzeitliche" (so kann man ihn nennen) weit mehr in das öffentliche Leben einschneiden. Insbesondere dürften Verwaltungs- und Gerichtsbeamte, Juristen, Chronologen, Diplomaten und andere Leute, welche oft die Zwischenzeit zwischen entlegenen und neueren Daten zu bestimmen haben, nicht sehr von der Aussicht erbaut sein, noch auf eine „neuzeitliche" Datierung achten zu müssen. Die Hoffnung, welche sich manche machen, daß durch die Reform — weil die Wochentage auf demselben Jahresdatum verbleiben sollen — die Herausgabe und die Berechnung der Kalender überflüssig werden wird, dürfte sich am wenigsten erfüllen. Der Kalender wird nicht nur gebraucht, um zu wissen, welcher Wochentag auf irgendeinen Monatstag fällt; er soll auch die Zeiten der Mondphasen, der Auf- und Untergänge des Mondes für bestimmte Orte, die Finsternisse und andere Himmelserscheinungen bringen. Die Berechnung der Kalender wird also nach wie vor der Astronomie überlassen bleiben, um so mehr (was offenbar manchen der Reformatoren nicht bekannt ist) als sämtliche den Sonnen-, Mond- und Planetenlauf betreffenden Angaben sich fortwährend ändern und daher alljährlich neu berechnet werden müssen. Diese Rechnungen werden derzeit von eigenen Staatsinstituten ausgeführt, in Berlin vom Königl. Astronomischen Recheninstitut, in Paris vom Bureau des Longitudes und in Washington und Greenwich von den astronomischen Bureaus der Admiralität. Auf die Resultate dieser Rechnungen gründen sich die Haupt- und Normalkalender, welche von diesen Instituten herausgegeben werden (Astronomisches Jahrbuch und preußischer Normalkalender in Berlin, Connaissance des temps in Paris, Nautical Almanac in Greenwich, American Ephemeris in Washington). Diese Jahrbücher dienen selbst wieder für die Provinzial- und Volkskalender als Grundlage. So befindet sich also jetzt die Verwaltung des Kalenders in den besten und zuverlässigsten Händen, und daß es sich mit den täglichen Zeitangaben ebenso verhält, wird im nächsten Kapitel noch eingehend dargelegt werden.

Hoffnungen der Reform.

Überwachung des Kalenders.

1) Man hätte 27 Schaltjahre in Intervallen von je vier Jahren und vier Schaltjahre in Intervallen von fünf Jahren einzuschieben; $97 \cdot 365 + 31 \cdot 366$ gibt 46751 Tage in 128 Jahren; ebendenselben Betrag geben 128 Jahre mit der mittleren Sonnenjahrlänge 365 Tage 5 Stunden 48 Minuten 45 Sekunden gerechnet, die Differenz macht, wenn man Bruchteile der Sekunden berücksichtigt, nur 1,43 Sekunden aus, d. h. in 60420 Jahren einen Tag. Praktisch ist diese Schaltung natürlich nicht zu brauchen.

Literatur.

Zur ersten Einführung in den Gegenstand kann dienen: J. BACH, Kalenderbuch für Schule und Haus (Straßburg i. Els., 1910); L. IDELER, Lehrbuch der Chronologie (Berlin, 1829); B. M. LERSCH, Einleitung in die Chronologie, 2 Teile (Freiburg i. Br., 1899). — Für nähere Kenntnis des astronomischen Teiles der Chronologie: TH. EPSTEIN, Geonomie (Wien, 1888); H. C. E. MARTUS, Astronomische Erdkunde, 3. Aufl. (Dresden-Leipzig, 1904). — Zur mathematischen Behandlung der Chronologie: W. MATZKA, Die Chronologie in ihrem ganzen Umfange (Wien, 1844). — Zur detaillierten Kenntnis des Zeitrechnungswesens der verschiedenen Völker (mit Berücksichtigung der Literatur bis auf die Neuzeit und des neuesten archäologischen Materials): F. K. GINZEL, Handbuch der mathematischen und technischen Chronologie. I. Band: Zeitrechnung der Babylonier, Ägypter, Mohammedaner, Perser, Inder, Südostasiaten, Chinesen, Japaner und Zentralamerikaner (Leipzig, 1906). II. Band: Zeitrechnung der Juden, der Naturvölker, der Römer und Griechen; Nachträge zum I. Bd. (Leipzig, 1911). III. Band [in Vorbereitung]: Zeitrechnung in Makedonien, Kleinasien und Syrien, nordische und keltische Zeitrechnung, mittelalterlich-christliche Zeitrechnung, die osteuropäische und orientalische Zeitrechnung der Christen, die Zeitrechnung der neueren Zeit; Nachträge zum I. und II. Band.

DIE ZEITMESSUNG.

Von

J. Hartmann.

Notwendigkeit einer genauen Zeitmessung.

I. Die Entwicklung der Zeitmessung im Altertum. Ohne genaue Einteilung der Zeit, ohne einheitliche, übereinstimmende Zeitangaben wäre die moderne Kultur undenkbar. Es wäre keine Verabredung zu gemeinschaftlichem Tun möglich, kein auf die Minute geordneter Verkehr und überhaupt keine ökonomische Ausnutzung der Zeit, wenn nicht die Astronomie eine zuverlässige, von jeder Willkür freie Einteilung des Tages lieferte. Wesentlich höhere Ansprüche an eine scharfe Zeitbestimmung als der öffentliche Verkehr stellen noch manche Gebiete der Wissenschaft. Während für den am pünktlichsten geregelten Betrieb von Post und Eisenbahnen stets die Zeitangabe auf die Minute genügt, erfordern viele wissenschaftliche Aufgaben die Messung winziger Bruchteile einer Sekunde. Durch das sogenannte absolute Maßsystem werden jetzt alle Kräfte und alle physikalischen Eigenschaften der Körper in den drei Einheiten Gramm, Zentimeter und Sekunde ausgedrückt, und man nimmt daher an, daß die Sekunde eine ebenso unveränderliche, genau bestimmbare Maßeinheit sei wie ein Gramm und ein Zentimeter. Dabei besteht aber der fundamentale Unterschied, daß die Beträge der Längeneinheit, des Meters, und der Masseneinheit, des Kilogramms, in sogenannten Normalmaßen hergestellt und für fortwährende Vergleichung und Benutzung aufbewahrt werden können, wodurch sowohl die Zuverlässigkeit der Normalen selbst als auch die einheitliche Größe aller von ihnen genommenen Kopien und die Übereinstimmung der mit diesen ausgeführten Messungen in hohem Grade verbürgt wird. Ganz anders ist es mit der Zeiteinheit. Die Zeitintervalle werden mit einer guten Uhr gemessen, von der man jedoch niemals ohne weiteres annehmen kann, daß sie absolut richtig gehe. Vielmehr muß der Gang der Uhr in jedem einzelnen Falle durch astronomische Beobachtungen, sogenannte Zeitbestimmungen, kontrolliert werden, und man muß daher von jeder solchen Zeitbestimmung eine ähnliche Zuverlässigkeit verlangen, wie sie die Vergleichungen eines Maßstabes mit dem Normalmeter besitzen.

Erforderliche Genauigkeit der Reproduktion der Zeiteinheit.

Beispiel der Pendelmessung

Ein Beispiel wird das sofort klar zeigen. Die Anziehungskraft der Erde, die Schwerkraft, ist infolge der Gestalt und Rotation des Erdkörpers von Ort zu Ort verschieden, und ihr Wert bzw. die durch sie bewirkte Be-

schleunigung wird durch die sogenannten Pendelbeobachtungen gemessen, indem man die Schwingungsdauer eines Pendels von bekannter Länge genau ermittelt. Die Schwerebestimmung mit Hilfe des Pendels besteht aus zwei verschiedenen Aufgaben, erstens einer Längenmessung, nämlich der Vergleichung des benutzten Pendels mit einem Normalmeter, und zweitens einer Zeitmessung, nämlich der Messung der Dauer einer Pendelschwingung durch Vergleichung dieser Schwingungen mit den Angaben einer Uhr, deren Gang durch astronomische Zeitbestimmungen ermittelt wird. Nun läßt sich die Messung der absoluten Länge des Pendels etwa mit einer Genauigkeitsgrenze von einem Millionstel ihres ganzen Betrages ausführen, und eine ähnliche Sicherheit muß man also auch von der Messung der Schwingungsdauer verlangen, wenn die Genauigkeit der ganzen Schwerebestimmung von derselben Größenordnung sein soll. Die hier geforderte Genauigkeit, ein Zeitintervall bis auf ein Millionstel seines Betrages, also z. B. den Zeitraum einer Stunde bis auf eine Dreihundertstelsekunde richtig zu messen, wird nun von den jetzigen astronomischen Zeitbestimmungen mit Leichtigkeit erreicht. Um den Gang der für die Messung der Schwingungsdauer benutzten Uhr zu kontrollieren, macht man nämlich am Abend vor und am Abend nach den Pendelmessungen eine astronomische Zeitbestimmung, die die an den Angaben der Uhr anzubringende Verbesserung mit einer Sicherheit von etwa einer Vierzigstelsekunde liefert. Sind diese beiden, die Pendelmessung einschließenden Zeitbestimmungen zufällig im entgegengesetzten Sinne je um eine Vierzigstelsekunde fehlerhaft, so wird im ungünstigsten Falle das ganze Intervall zwischen den Zeitbestimmungen, also die Dauer des Tages, um eine Zwanzigstelsekunde, um $0^s{,}05$, falsch gefunden werden. Da nun der Tag 86400 Sekunden hat, so beträgt der Irrtum $\frac{0{,}05}{86400} = 0{,}00000058$, mithin erst ein halbes Millionstel des ganzen Intervalls; mit dieser Genauigkeit ist der Gang der Uhr astronomisch bestimmt, und mit gleicher Genauigkeit kann die so kontrollierte Uhr zur Messung von Zeitintervallen verwendet werden, wobei nur vorausgesetzt werden muß, daß ihr Gang während des ganzen Zeitraumes zwischen den beiden Zeitbestimmungen völlig unveränderlich bleibt.

Die hier als Beispiel besprochenen Pendelmessungen stellen von allen physikalischen Beobachtungen die höchsten Anforderungen an die Genauigkeit in der Messung eines Zeitintervalls. Für andere Bedürfnisse der Wissenschaft und des Verkehrs genügt eine weit geringere Schärfe, und es reicht z. B. bei der Messung von Geschwindigkeiten wie bei der Prüfung von Schußwaffen, von Fahrzeugen und in ähnlichen Fällen aus, die Zeitintervalle mit einer guten Uhr zu messen, deren Gang nur nach den öffentlichen Zeitangaben einigermaßen berichtigt ist.

Erforderliche Genauigkeit der absoluten Zeitbestimmung.

Wird nicht die Messung eines Zeitintervalls, sondern die absolute Angabe eines Zeitpunktes verlangt, so ist die astronomische Zeitmessung ebenfalls allen Anforderungen gewachsen. Für den öffentlichen Verkehr, nament-

lich für den Eisenbahnbetrieb sollen die Zeitangaben der Uhren innerhalb einer Minute richtig sein. Dieselbe Fehlergrenze genügt auch für die meteorologischen Beobachtungen von Wind und Wetter. Wesentlich höhere Anforderungen stellen schon gewisse geophysikalische Beobachtungen, die erdmagnetischen und seismischen Registrierungen. Die Uhrenindustrie verlangt zur Regulierung und Prüfung der Präzisionsuhren, insbesondere der Marine-Chronometer, Zeitangaben, die stets auf wenige Zehntelsekunden zuverlässig sein müssen. Die äußerste Genauigkeit in der absoluten Zeitbestimmung wird jedoch bei den eigenen Arbeiten des Astronomen erforderlich. Wo die Zeitmessung, wie im nächsten Abschnitte dieses Werkes näher ausgeführt wird, zur Ortsbestimmung dient, also am Himmel zur Messung der Rektaszensionen, auf der Erde zur Bestimmung der geographischen Längen, da sucht man die Messung der absoluten Zeit auf einzelne Hundertstel einer Sekunde sicher zu gestalten. Und auch das gelingt der modernen Astronomie.

Historische Entwicklung der Zeitmessung.

Jedoch nicht immer waren die Ansprüche an eine genaue Zeitmessung so groß. Der öffentliche Verkehr spielte sich früher in so gemächlichen Formen ab, daß es auf mehrere Minuten, ja auf Viertel- und halbe Stunden nicht sonderlich ankam; in den meisten Gebieten der Wissenschaft hatte sich das Bedürfnis nach exakten Zeitangaben noch nicht geltend gemacht, und nur für ihren eigenen Bedarf waren die Astronomen jederzeit bemüht, die Zuverlässigkeit der Zeitmessung so weit zu vervollkommnen, als es die technischen Hilfsmittel jeder Epoche eben ermöglichten. Es ist interessant, die allmähliche Entwicklung der Zeitmessung von ihren ersten primitiven Anfängen bis zu ihrer gegenwärtigen Vollendung in Kürze zu überblicken.

Der Tag ist das fundamentale Zeitmaß.

Tag und Nacht mit ihren Gegensätzen von Licht und Finsternis, von Erwärmung und Abkühlung sind von jeher für alle Erdenbewohner, und zwar nicht nur für die Menschheit, sondern auch für die Tier- und Pflanzenwelt die natürlichen Einheiten gewesen, die die Zeit, den ruhelosen Verlauf der Erscheinungs- und Empfindungswelt, in kleinere, für die erste rohe Beobachtung nahezu gleiche, zählbare Abschnitte teilten. Und so finden wir bei allen Völkern und zu allen Zeiten den „Tag“, die Zusammenfassung des hellen Tages und der Nacht, als die fundamentale Zeiteinheit, nach deren Ablauf sich jedesmal zahllose biologische Vorgänge wiederholen und innerhalb deren deshalb die Hauptfunktionen des primitiven Lebens, Wachen und Schlafen, Arbeit und Nahrungsaufnahme mit einer gewissen Regelmäßigkeit verteilt sind. Es ist bemerkenswert, daß bei den meisten Völkern, gerade wie im Deutschen, das Wort „Tag“ eine zweifache Bedeutung hat, indem es einmal im Gegensatze zur Nacht nur den lichten Tag bezeichnet, sodann aber auch, als bürgerlicher oder Kalendertag, für die Zusammenfassung von Tag und Nacht gebraucht wird. In der ursprünglichen Vorstellung gehört eben zu jedem Tage eine Nacht, und nur die Tage wurden gezählt und bezeichnet. Gewisse Anzahlen von Tagen wurden dann unter Anlehnung an die auffälligen Erscheinungen des Mondlaufes und des Wechsels der Jahreszeiten zu größeren Zeiteinheiten, zu Wochen, Monaten und Jahren, zusammengefaßt.

Aber da sich die zuletzt erwähnten Erscheinungen viel weniger deutlich markieren als die Anfänge von Tag und Nacht, so konnten die Zeitmaße des Monats und des Jahres erst viel später, auf einer höheren Kulturstufe, nach ihrer wahren, in Tagen ausgedrückten Dauer festgestellt werden, und außerdem konnte sich eine große Mannigfaltigkeit in der Art der Zählung und Berechnung dieser längeren Zeitabschnitte ausbilden, wie das in dem vorhergehenden Kapitel über die Zeitrechnung eingehend dargelegt worden ist.

Verschiedener Beginn der Tageszählung

Aber auch innerhalb des einzelnen Tages war die Verteilung der Tätigkeit je nach Land, Klima und Völkerschaft verschieden, und dementsprechend haben sich ursprünglich eine Anzahl verschiedener Einteilungsarten des Tages entwickelt. Schon der Zeitpunkt, mit welchem man die Zählung eines neuen Tages begann, ist nicht überall einheitlich gewählt worden. Als natürliche Einteilungspunkte des Tages boten sich von selbst dar: der Anfang und das Ende des hellen Tages, die man entweder mit dem Aufgang und Untergang der Sonne oder auch mit dem Beginn der Morgendämmerung und dem Ende der Abenddämmerung zusammenfallen lassen konnte; ferner der Mittag, der Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes und des kürzesten Schattens, endlich die Mitte der Nacht, die zunächst hauptsächlich in der Vorstellung existierte, dann aber auch aus der Stellung der Gestirne bestimmt werden konnte. Tatsächlich hat jeder dieser vier Termine auch als Anfang der Tageszählung gedient.

1. mit dem Morgen,

Ursprünglich und naturgemäß wurde wohl fast überall die Zählung des neuen Datums mit dem Beginn des lichten Tages angefangen, so daß die zugehörige Nacht auf den hellen Tag folgte. So war es in Ägypten, und für das griechische und römische Altertum hat dies Bilfinger überzeugend nachgewiesen. Der eigentliche Träger des Datums war der Geschäftstag, zu dem noch die vorausgehende Morgendämmerung und die nachfolgende dunkle Nacht gerechnet wurde. Von dieser natürlichen Zählweise wurde nur da abgewichen, wo besondere Gründe dafür vorlagen. So bildete sich in der römischen Rechtspflege die Vorstellung von dem um Mitternacht erfolgenden Datumwechsel aus, die ja von der eben erwähnten morgentlichen Epoche nicht sehr verschieden ist, vor ihr aber den Vorzug der unveränderlichen Lage hat. Auch in China wird von alters her der Tag von Mitternacht ab gezählt. Die Juden und Mohammedaner, deren Kalender sich streng dem Mondlauf anschließt, beginnen ihre Monate mit dem Sichtbarwerden der schmalen Mondsichel in der Abenddämmerung, und mit dem Anfange des Monats mußten sie daher auch den der Tage auf die Abenddämmerung verlegen. Namentlich im religiösen Kultus dieser Völker ist das deutlich ausgesprochen, und von dem jüdischen Ritus wurden die Festfeiern der christlichen Kirche und hiermit die Zählweise der Wochentage beeinflußt. Jeder Sonn- und Festtag beginnt mit der Vesper des vorhergehenden Tages und endigt mit der Vesper des Festtages selbst, und die mit den höchsten Festtagen verbundenen nächtlichen Feiern, die Vigilien, werden in der vorhergehenden, nicht in der folgenden Nacht abgehalten. Als eine direkte Folge

2. mit Mitternacht,

3. mit dem Abend,

dieser christlich-kirchlichen Tageszählung ist wohl auch die eigentümliche Einrichtung der weiter unten noch zu besprechenden „italienischen Uhr“ mit ihrer nach Sonnenuntergang beginnenden Stundenzählung zu betrachten.

4. mit Mittag. Eine Zählung des Datums vom Mittage an würde für den bürgerlichen Verkehr äußerst unbequem und unpraktisch sein, da dann die Geschäfte desselben Werktages, je nachdem sie am Vor- oder Nachmittag ausgeführt sind, zu zwei verschiedenen Tagen zu rechnen wären. Nur bei der Tätigkeit des Astronomen liegen die Verhältnisse anders. Da der bei weitem größte Teil der astronomischen Beobachtungen während der Nacht ausgeführt wird, so wäre es unbequem und könnte zu Irrungen Anlaß geben, wenn während der Nacht, etwa um Mitternacht, ein neues Datum einträte. Daher beginnen die Astronomen seit Ptolemäus (150 n. Chr.) die Zählung des Tages am Mittag und zwar 12 Stunden nach dem jetzt üblichen Beginn desselben bürgerlichen Datums. Nur im Laufe des Nachmittags stimmen daher astronomisches und bürgerliches Datum überein, von Mitternacht bis Mittag ist dagegen die astronomische Bezeichnungsweise gegen die bürgerliche um einen Tag zurück.

Die jetzt im öffentlichen Verkehr überall gebräuchliche Zählung der Tage von Mitternacht zu Mitternacht war eine unabweisbare Folge der nach und nach immer schärfer werdenden öffentlichen Zeitmessung mittels der Räderuhren. Mit diesen den ganzen Tag jahraus jahrein in gleich lange Stunden teilenden Apparaten konnte sich auf die Dauer der mit dem wechselnden Sonnenstande im Laufe des Jahres stark veränderliche Tagesbeginn zur Morgen- und Abendzeit nicht vertragen, und so blieb von den vier besprochenen Anfangsterminen nur die Mitternacht als allgemein brauchbar übrig.

Primitive Einteilung des Tages in kleinere Abschnitte, Als Vorläufer einer eigentlichen Einteilung des Tages haben wir die Bezeichnungen einzelner Tageszeiten zu betrachten, wie sie z. B. Homer benutzt: ἠώς die Morgenröte, μέσον ἦμαρ Mittag, δείλη Abenddämmerung, ἕσπερος Abend, νύξ Nacht, ἀμφιλύκη νύξ Morgengrauen. Wie gering selbst während der Blütezeit des griechischen Altertums noch die Ansprüche an eine genauere Einteilung der Tageszeit waren, kann man daraus erkennen, daß das einzige Hilfsmittel zur Zeitbestimmung im στοιχεῖον, der Messung der Länge des eigenen Schattens bestand, wobei die Füße als Maß dienten.

in 8 Teile, Einen ersten Fortschritt zur genaueren Zeitmessung bilden die verschiedenen Versuche, die Dauer des hellen Tages und die der Nacht für sich in eine Anzahl gleicher Teile zu teilen. Um die Wachposten im Feldlager regelmäßig abzulösen, teilten die Griechen die Nacht von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang in 4 Wachen, deren Dauer mit einer Wasseruhr (κλεψύδρα) gemessen wurde; auch im römischen Heere findet sich derselbe Brauch. Ebenso wurde der lichte Tag in Rom in 4 Teile geteilt, und es bestand die alte Sitte, daß der Amtsdiener des Prätors diese Hauptzeiten laut ausrief.

in 12 Doppelstunden, Unsere jetzige Einteilung des Tages in 24 Stunden ist wohl auf zwei Quellen zurückzuführen, die sich im Altertum unabhängig voneinander und gleichzeitig entwickelt haben. Bei den Babyloniern bestand eine Tagestei-

lung in 12 gleiche Abschnitte, die also je 2 unserer Stunden entsprechen und darum als Doppelstunden bezeichnet werden. Ihre Entstehung mag einerseits in dem durch Vorderasien weitverbreiteten, bis in die Sumerische Zeit zurückreichenden Sexagesimalsystem begründet sein, andererseits aber wohl auch in der Zwölfteilung des Tierkreises. Denn da angenähert 12 Umläufe des Mondes in einem Jahre enthalten sind, so bewegt sich die Sonne in der Ekliptik in jedem Monat um etwa ein Zwölftel des ganzen Umkreises fort, und aus diesem Grunde wurde die ganze Sonnenbahn in die 12 Zeichen des Tierkreises eingeteilt. Die 12 Sternbilder des Tierkreises boten nun ein leichtes Mittel zur genäherten Zeitbestimmung dar. Für jeden Monat war der Ort der Sonne in der Ekliptik bekannt; wenn nun nachts das diesem Orte gegenüberliegende Tierkreiszeichen seinen höchsten Stand am Südhimmel hatte, also kulminierte, dann war es Mitternacht; bei der Kulmination des nächsten Zeichens war es eine Doppelstunde, ein Zwölftel des Tages, später und so für jedes Zeichen eine Doppelstunde mehr. Auf diese Weise mußte ganz von selbst eine Einteilung des Tages in 12 Doppelstunden entstehen, die durch den sexagesimalen Charakter der Zahl 12, ihre Teilbarkeit durch 2,3 und 4 noch unterstützt und befestigt wurde. Auch die Chinesen und Japaner haben diese Zwölfteilung des ganzen Tages. Daneben kannten die Babylonier noch eine zweite Sexagesimalteilung, die den ganzen Tag in 6 Teile und jeden von diesen in 60 Abschnitte teilte, die also der jetzt noch gebräuchlichen Einteilung des ganzen Kreises in 360 Grade entsprach; jeder dieser Zeitgrade wurde weiter in 60 Minuten, die Minute in 60 Sekunden, die Sekunde in 60 Terzien geteilt. Diese Tagesteilung war aber lediglich in der wissenschaftlichen Astronomie üblich, während man im öffentlichen Leben nur die 12 Doppelstunden kannte.

Von den Babyloniern hat Griechenland dieses Zeitmaß der Doppelstunden übernommen, wie Herodot (II 109) ausdrücklich bezeugt: „Die Sonnenuhren und die Zwölfteilung des Tages haben die Griechen von den Babyloniern kennen gelernt." Wann der Übergang zu der Teilung des ganzen Tages in 24 Stunden gemacht worden ist, läßt sich nicht nachweisen, jedoch ist hierbei wohl außer dem von Herodot behaupteten babylonischen Einfluß noch ein solcher von Ägypten her erfolgt. Denn in Ägypten bestand von alters her eine eigentümliche 24-Teilung des ganzen Tages: der lichte Tag und die Nacht wurden für sich je in 12 Stunden geteilt, die natürlich im allgemeinen nur innerhalb der Tageszeit und innerhalb der Nachtzeit untereinander gleich waren, während zwischen Tag- und Nachtstunden ein mit der Jahreszeit wechselnder Unterschied bestand. Man nennt diese Stunden Temporalstunden. Da sich nun in Griechenland seit der alexandrinischen Zeit genau diese Temporalstunden vorfinden, so darf man wohl mit Sicherheit ägyptischen Einfluß annehmen. Von Griechenland gelangte ihre Kenntnis nach Rom, von wo sie sich in der ganzen christlichen Welt verbreitete, so daß bis in das 14. Jahrhundert der Tag auf diese Art eingeteilt worden ist.

in 24 Stunden.

Die Temporalstunden.

Sonderbar erscheint es unserm heutigen hochentwickelten Zeitsinn, daß diese schwerfällige Einrichtung der Temporalstunden mehrere Jahrtausende lang die ganze zivilisierte Welt beherrscht hat. Denn wie vom Sommer zum Winter die Dauer des Tages immer kürzer, die der Nacht immer länger wurde, so mußte auch die Länge der einzelnen Stunden am Tage entsprechend kleiner, in der Nacht größer werden. So beträgt für Rom die Dauer des längsten Tages $15^h\,5^m$, die des kürzesten nur $8^h\,55^m$, und es mußten also die kurzen Stunden der Wintertage beinahe nur halb so lang sein als die langen Sommerstunden; in unserm jetzigen Zeitmaß ausgedrückt dauerte die Temporalstunde im Sommer $1^h\,15^m$, im Winter nur 45^m. Es machte besondere Schwierigkeiten, die in ihrer Länge fortwährend wechselnden Stunden zu messen, und man kann sich denken, daß es auch nur mit einer gewissen Annäherung gelang, den veränderlichen Tag immer in die 12 Stunden einzuteilen. Aber trotzdem darf man sagen, daß die Temporalstunden für die damalige Kulturstufe das am besten passende Zeitmaß waren. Der Unterschied zwischen Tag und Nacht, der durch die moderne Beleuchtungstechnik immer mehr verwischt wird, hatte zu jenen Zeiten eine für das ganze öffentliche Leben durchaus maßgebende Bedeutung; alle wichtigen Arbeiten und Geschäfte mußten bei Tageslicht erledigt werden, und daher war es nur natürlich, daß man den hellen Tag als eine von der Nacht ganz verschiedene Zeit behandelte, beide getrennt in je 12 Stunden teilte und die Zählung des Datums mit dem Morgen begann. Dazu kam, daß die gebräuchlichen Hilfsmittel der Zeitmessung am Tage und in der Nacht verschieden waren — am Tage die Sonnenuhren, nachts die Wasseruhren und der Sternhimmel —, so daß schon aus diesem Grunde nach Sonnenuntergang mit einer neuen Zeitmessung und -einteilung begonnen werden mußte. Erst die allgemeinere Verbreitung der Räderuhren hat hierin Wandel geschaffen.

Römische und christliche Horen.

Zu den Römern war die Zwölfteilung des lichten Tages von den Griechen wohl im Jahre 293 v. Chr. mit der ersten Sonnenuhr übergegangen, und auch die griechische Bezeichnung hora für die Stunde bürgerte sich in Rom ein, wo sie sich mit der schon erwähnten volksüblichen Vierteilung des Tages verband, so daß man nun die hora tertia, sexta und nona als Kardinalteilpunkte des Tages antrifft. Diese römische Zeiteinteilung verbreitete sich auch über die Provinzen, und so kommt es, daß sie auch den Zeitangaben des Neuen Testamentes zugrunde liegt; man erinnere sich z. B. an das Gleichnis von den Arbeitern im Weinberge (Matth. 20). Die christliche Kirche machte dann diese Vierteilung des Tages in der Form der horae canonicae zur Grundlage ihrer Gebets- und Gottesdienstordnung; die Pfarr- und Klosterkirchen verkündeten diese Horen durch Glockenzeichen, die zwar zunächst das Laienpublikum an die regelmäßigen Gebete und Gottesdienste erinnern sollten, sodann aber auch zur Regelung der ganzen bürgerlichen Tageseinteilung benutzt wurden. Man hatte vom 5. Jahrhundert an folgende Glockenzeichen:

1. die Matutin im dritten Viertel der Nacht,
2. die Prima bei Tagesanfang,
3. die Tertia um Mitte des Vormittags,
4. die Sexta um Mittag,
5. die Nona um Mitte des Nachmittags,
6. die Vespera eine Stunde vor Sonnenuntergang,
7. das Completorium beim Tagesschluß.

Das sind dieselben Zeiten, nach denen noch heute die Breviergebete der katholischen Geistlichen geordnet und benannt sind. In den allgemeinen Sprachgebrauch sind die Worte Mette von Matutin und Siesta von Sexta übergegangen. Im Laufe der Zeit traten einige Veränderungen in der Bedeutung dieser kirchlichen Zeiten ein, von denen die wichtigste darin besteht, daß die Sexta mehr und mehr zurücktrat, während die Nona auf den Mittag rückte (13. bis 15. Jahrhundert); aus dieser Zeit leitet sich das englische Noon für Mittag her.

Die Äquinoktialstunden.

Die Einteilung des bürgerlichen Tages nach den durch die Glockenzeichen verkündeten kirchlichen Horen beherrscht das ganze Mittelalter, bis sich im Anfang des 14. Jahrhunderts die Schlaguhren zunächst in Italien, dann auch rasch in andern Ländern verbreiteten und den Anlaß zur Einführung der gleichmäßigen Einteilung des ganzen Tages in 24 Stunden gaben. Wohl war die schon Ptolemäus bekannte Teilung des Tages in 24 gleich lange Stunden niemals ganz verloren gegangen, aber ihr Gebrauch beschränkte sich auf die astronomischen Arbeiten, während das öffentliche Leben nach den Temporalstunden geordnet war. Nur zweimal im Jahre, zur Zeit des Frühlings- und Herbstäquinoktiums, wenn Tag und Nacht gleich lang waren, hatten die Temporalstunden am Tage und in der Nacht gleiche Dauer; sie hatten dann ihre mittlere Länge und waren den Stunden gleich, die sich bei der Einteilung des ganzen Tages in 24 gleiche Stunden ergaben. Letztere gleichförmige Zeiteinteilung bezeichnete man deshalb auch als Äquinoktialstunden.

Gründe für deren Einführung:

Bei der erwähnten Einführung dieser gleichmäßigen Tagesteilung am Ausgange des Mittelalters mögen wohl mehrere Ursachen bestimmend gewesen sein. Zunächst möchte man fast glauben, daß in den früheren Jahrhunderten der Zeitsinn der Allgemeinheit noch so wenig entwickelt war, daß man keinerlei Anstoß an dem ungleichförmigen Zeitmaß der Temporalstunden nahm. Für unsere Vorstellung gehört es untrennbar zu dem Begriffe des Messens, daß das Maß konstant, aus gleichen Teilen zusammengesetzt sei. Wenn man jetzt von unserm gleichförmigen Zeitmaße plötzlich zu den Temporalstunden zurückkehren wollte, so würde das der größte Teil des Publikums aller Bevölkerungsschichten sofort höchst unangenehm empfinden. Das Bewußtsein der Notwendigkeit eines solchen gleichförmigen Zeitmaßes, wie es z. B. für die Entlohnung nach der Zeit bemessener Arbeitsleistungen gebraucht wird, mag nun in jener Zeit, als Handel und Verkehr zur Blüte des städtischen Bürgertums führten, besonders rege geworden sein. Schon hatte

1. Bedürfnis eines unabhängigen, gleichförmigen Zeitmaßes,

man in den Städten neben den kirchlichen Glockenzeichen eine große Menge anderer rein bürgerlicher Glockensignale eingeführt, um die verschiedenen Tätigkeiten der Bevölkerung in Einklang zu erhalten. Aber je lebhafter sich die kaufmännischen und gewerblichen Betriebe entfalteten, um so mehr mußte sich das Bedürfnis einer selbständigen, von der Kirche unabhängigen, gleichmäßigen Zeiteinteilung geltend machen. Dieses Bedürfnis führte im Anfange des 14. Jahrhunderts an vielen Orten zur Aufstellung öffentlicher Schlaguhren.

2. Einführung der Schlaguhren.

Erst die Anbringung des Schlagwerkes an den Räderuhren drängte gewaltsam zur Einführung eines gleichförmigen Zeitmaßes hin. Mit dem Prinzip der gleichmäßig gehenden Räderuhren hätte sich zur Not das System der Temporalstunden noch vereinigen lassen. Man brauchte ja nur den durch das Räderwerk gleichförmig bewegten Zeiger auf einem den verschiedenen Temporalstunden entsprechend geteilten und mit der Jahreszeit wechselnden Zifferblatte spielen zu lassen; derartig ungleichförmig geteilte Zifferblätter waren schon bei den Wasseruhren zur Anwendung gekommen. Solange man die öffentlichen Zeitzeichen wie bei den Römern durch Ausrufen oder später durch Anschlagen der Glocken mit der Hand nur nach den Angaben des Zifferblattes einer Uhr gab, kam es also auf die Gleichförmigkeit der Stundenteilung nicht weiter an. Erst als man mit den Räderuhren ein automatisches Schlagwerk verband, war man vor die Entscheidung gestellt, entweder dieses Räderwerk in einer recht komplizierten Weise für die ungleichförmigen Stunden einzurichten oder aber zu einer dauernden Benutzung der ja durchaus nicht ganz unbekannten gleichförmigen Äquinoktialstunden überzugehen. Man wählte allgemein den letzteren Weg.

Verschiedene Zählung der Äquinoktialstunden.

Die Überführung der alten in die neue Zeitteilung gab nun wieder zu einigen lokalen Eigentümlichkeiten Anlaß, die hier kurz erwähnt werden müssen, da sie noch jahrhundertelang dem öffentlichen Leben charakteristische Formen verliehen haben. Die Zählung der Temporalstunden hatte zweimal am Tage, des Morgens und des Abends, von neuem begonnen. Man stand also zunächst vor der Wahl, auch bei der neuen Zeiteinteilung entweder an jedem Tage die Stunden zweimal von 1 bis 12 zu zählen oder einmal von 1 bis 24, was eigentlich der Teilung des ganzen Tages in 24 gleiche Stunden jetzt besser entsprach. Ferner konnte man im Zweifel sein, von welchem Zeitpunkte an die Zählung beginnen sollte, entweder wie die Temporalstunden von Morgen oder Abend oder aber, was einer gleichmäßigen Teilung aller Tage allein entsprach, von Mittag oder Mitternacht. Das Bestreben, von der althergebrachten Zeitrechnung möglichst viel beizubehalten, hat da auf verschiedene uns jetzt recht sonderbar anmutende Systeme der Stundenzählung geführt.

Die italienische Uhr.

In Italien, wo die Schlaguhren zuerst eingeführt wurden, behielt man den oben erwähnten christlichen Tagesbeginn mit Sonnenuntergang bei und zählte die Stunden von 1 bis 24. So entstand die eigentümliche, namentlich durch Goethes Schilderung allgemeiner bekannt gewordene sogenannte „italienische Uhr“, die sich in Italien bis in die ersten Jahrzehnte des vorigen

Jahrhunderts erhalten hat, aber auch in Böhmen, Österreich und Schlesien eine Zeit lang benutzt wurde. Gewiß mochte diese Art der Stundenzählung gerade in Italien auch einige Vorteile haben, wie Goethe anschaulich hervorhebt: „Wie viele Handwerker arbeiten vor den Häusern auf freier Straße ... wie mancherlei geschieht auf den Märkten, Plätzen und in den Höfen! Daß bei einer solchen Lebensart der Moment, wo die Sonne untergeht und die Nacht eintritt, allgemeiner entscheidend sein müsse als bei uns, wo es manchmal den ganzen Tag nicht Tag wird, läßt sich leicht einsehen. Der Tag ist wirklich zu Ende; alle Geschäfte einer gewissen Art müssen auch geendigt werden.“ Aber diesem Vorteile standen doch auch erhebliche Nachteile gegenüber: im Sommer, bei hoher Sonnendeklination, ist die Zeit von Mittag bis Sonnenuntergang länger als von da bis Mitternacht, im Winter ist es umgekehrt. Zählt man die Stunden daher von Sonnenuntergang oder, wie es Sitte war, eine halbe Stunde nach Sonnenuntergang an, so mußten sich im Laufe des Jahres die Zeitpunkte von Mittag, Mitternacht und Sonnenaufgang erheblich verschieben. In Rom betrug diese Verschiebung für Mittag und Mitternacht 3 Stunden, für den Sonnenaufgang sogar 6 Stunden, von $8^1/_2$ Uhr im Sommer bis $14^1/_2$ Uhr im Winter. Aber noch schlimmer als diese Verschiebung einiger Tageszeiten, die sich auch bei unserer heutigen Stundenrechnung nicht vermeiden läßt, war es jedenfalls, daß das Zeitmaß selbst sowie der Anfang der Zählung nicht unveränderlich waren, so daß die Uhren, um die gewünschten Stunden zu zeigen, fortwährend verstellt werden mußten. Wie Delambre noch im Jahre 1814 berichtet (Astronomie théorique et pratique III 688), verstellte man die Uhren nicht täglich, sondern ließ den Fehler auf eine Viertelstunde anwachsen, um dann diesen Betrag auf einmal zu korrigieren. An manchen Orten pflegte aber auch einfach der Türmer die Uhr auf 24 Stunden zu stellen, wenn er glaubte, daß der nötige Grad der Dunkelheit eingetreten sei, wodurch die Zeitangaben nicht nur vom Sonnenstande, sondern auch von der Bewölkung abhängig wurden — gewiß keine ideale Zeitmessung. Erst zwischen 1825 und 1830 gingen die italienischen Städte zu der auch bei uns üblichen Rechnung nach mittlerer Ortszeit über; der Tag wurde um Mitternacht begonnen und in 24 gleich lange Stunden geteilt, die zweimal von 1 bis 12 gezählt wurden.

Die Nürnberger Uhr.

Nahe gleichzeitig mit der „italienischen Uhr“ oder dem „ganzen Zeiger“ entstanden bei der Einführung gleichmäßiger Stunden um die Mitte des 14. Jahrhunderts noch mehrere andere Arten der Stundenzählung, indem hier die eine, dort die andere Eigentümlichkeit der alten Temporalstunden beibehalten wurde. Die Nürnberger Uhr, die ebenfalls bis in das 18. Jahrhundert im Gebrauch war, behielt die getrennte Zählung der Tag- und Nachtstunden bei; da aber die Stunden nun nicht mehr die wechselnde Länge der Temporalstunden hatten, sondern gleich lang waren, so mußte die Zwölfzahl aufgegeben werden. Im Sommer zählte man am Tage von 1 bis 16 Uhr, nachts von 1 bis 8 Uhr, umgekehrt im Winter tags 8 Stunden, nachts 16. Die Kalender enthielten Angaben, zu wieviel Stunden jeder Tag zu rechnen war.

Die halbe Uhr.

Die größte Bedeutung für alle spätere Zeit hat aber die sogenannte „halbe oder kleine Uhr“ oder der „halbe Zeiger“ erlangt. Bei dieser wurden täglich zweimal 12 Stunden gezählt, und zwar beginnend mit Mitternacht und Mittag. Da letztere Zeitpunkte im Laufe des ganzen Jahres sehr nahe gleiche Abstände voneinander behalten, so entspricht die Zählung von ihnen als Anfangspunkten am besten einer gleichmäßigen Einteilung der Zeit, und sie vertrug sich am vollkommensten mit dem gleichförmigen Gange der Uhren. Diese Zeitzählung taucht ebenfalls kurz vor 1400 auf, und sie verbreitete sich zunächst über Deutschland, Frankreich, Spanien und England. Man geht wohl nicht fehl, wenn man annimmt, daß für die immer weitere Ausbreitung dieser Stundenteilung der Einfluß der Uhrmacher maßgebend gewesen ist, die an den Pendel- und Taschenuhren die gleichmäßige Teilung in 12 Stunden am bequemsten anbringen konnten. Auch in Nürnberg selbst, einer Hauptstätte der Uhrmacherkunst, befanden sich um 1611 neben der oben erwähnten „großen Uhr“ schon zwölf Schlaguhren, die die Stunden nach der „kleinen Uhr“ schlugen. Nach dem Schwinden der italienischen Uhr treffen wir daher im 19. Jahrhundert fast überall die von Mitternacht an gerechnete halbe Uhr an.

Die türkische Uhr.

Nur in der Türkei hat sich noch lange eine der mohammedanischen Zeitrechnung angepaßte Abart der halben Uhr — eine Mittelart zwischen dieser und der italienischen Uhr — erhalten. Man teilte zwar auch den ganzen Tag in 24 gleich lange Stunden, zählte aber nach Sonnenuntergang mit dem Rufe des Muezzins vom Minaret beginnend zunächst 12 derselben als Nachtstunden, dann die andern 12 als Tagstunden; der Beginn der Tagstundenzählung fiel demnach nur zweimal im Jahre mit dem wirklichen Tagesanfang zusammen, mußte sich aber sonst, wie schon bei der italienischen Uhr bemerkt wurde, bis zu mehreren Stunden von ihm entfernen. Übrigens schlugen auch in Italien die Uhren nicht bis 24, sondern nur bis 12, und man zählte in der zweiten Hälfte des Tages 12 hinzu. In Italien ist man seit dem 1. November 1893 wieder zu einer den modernen Erfordernissen angepaßten Form der ganzen Uhr zurückgekehrt, indem man von Mitternacht beginnend die Stunden bis 24 zählt.

Die Zählung der halben Uhr von Mitternacht und Mittag schloß sich in den bisher besprochenen Kulturepochen immer streng an den Lauf der Sonne an: es war in jedem Orte Mittag, wenn die Sonne ihren höchsten Stand am Himmel erreichte. Man bezeichnet dies jetzt als die Rechnung nach „wahrer Ortszeit“. Seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts vollzog sich dann der Übergang zur „mittleren Ortszeit“, der wieder mit einer Verschärfung der Zeitmessung verbunden war. Bevor wir jedoch diese Weiterentwicklung besprechen können, wird es notwendig sein, auf die Grundlagen der astronomischen Zeitmessung selbst näher einzugehen.

Kants Definition der Zeit.

II. Die Grundlagen der Zeitmessung. Eine erschöpfende Definition des Begriffes „Zeit“ zu geben, überläßt der Astronom gern dem Philosophen.

Nur einige Gedanken mögen hier geäußert werden. Wenn Kant in seiner Kritik der reinen Vernunft (§ 6) sagt: „Die Zeit ist nicht etwas, was für sich selbst bestünde oder den Dingen als objektive Bestimmung anhinge, mithin übrig bliebe, wenn man von allen subjektiven Bedingungen der Anschauung derselben abstrahiert“ ... „Die Zeit ist nichts anders als die Form des innern Sinnes, d. i. des Anschauens unserer selbst und unsers innern Zustandes“ ... „Hierin besteht also die transzendentale Idealität der Zeit, nach welcher sie, wenn man von den subjektiven Bedingungen der sinnlichen Anschauung abstrahiert, gar nichts ist“..., so dürfte er wohl kaum mehr die allgemeine Zustimmung finden. Denn wenn auch einmal alles organische Leben in der ganzen Welt vernichtet würde, so daß jede Möglichkeit der subjektiven Anschauung fortfiele, so könnte trotzdem der zeitliche Verlauf der Dinge, also z. B. die Bewegung der Himmelskörper, ungehindert weiter fortbestehen. Nur wenn jede Veränderung aufhört, dann hört auch die Zeit auf. Ich möchte die Zeit als die einzige a priori unabhängig veränderliche Größe bezeichnen, die einzige an sich stets unabhängige Variable, wie der Mathematiker sagen würde, die daher notwendige Bedingung für jede Veränderung ist. Denn wenn sich überhaupt irgend etwas ändert, dann ändert sich gewiß auch die von keiner Bedingung abhängige Variable, dann existiert also die Zeit. Nach dieser Definition kann die Zeit also auch nicht von der Bewegung des Beobachters oder von der Lichtgeschwindigkeit abhängig sein, wie das eine moderne physikalische Theorie behauptet. Denn selbst angenommen, daß etwa der Gang unserer Uhren dadurch, daß sich die Erde mit einer Geschwindigkeit von 30 km in einer Sekunde in einer Richtung, ein halbes Jahr später ebenso schnell in der entgegengesetzten Richtung im Raume fortbewegt, irgendwie beeinflußt würde, so würden die Astronomen doch diesen Einfluß, sobald er praktisch oder theoretisch nachgewiesen worden wäre, durch geeignete Berechnung korrigieren, genau so, wie sie jetzt etwa den Einfluß von Änderungen des Luftdruckes oder der Temperatur berücksichtigen. Das Wesen und der Verlauf der Zeit selbst kann durch keinen physikalischen Einfluß betroffen werden.

Die Zeit ist die unabhängige Veränderliche,

Daher bildet die Zeit auch das gegebene, natürliche Maß jeder Veränderung; wir sagen, eine Veränderung, etwa eine Bewegung, erfolge gleichmäßig, wenn in aufeinanderfolgenden gleichen Zeiträumen gleiche Beträge der Veränderung stattfinden; mehrere Ereignisse finden gleichzeitig statt, wenn ihnen derselbe Wert der unabhängigen Veränderlichen, derselbe Zeitpunkt entspricht. Daraus ergibt sich nun sofort auch die Notwendigkeit einer genauen Zeitmessung und einheitlichen, unzweideutigen Bezeichnung der Zeitpunkte.

dient zum Messen aller Veränderungen,

Nun ist aber die Zeit selbst für uns in keiner Weise direkt wahrnehmbar, wir können sie nur an den Veränderungen entweder in der Außenwelt oder auch in unserer Person selbst — sei es geistig, sei es körperlich — erkennen. Zwar besitzen wir, wohl im Zusammenhang mit den unwillkürlichen rhythmischen Bewegungen unserer Organe, ein schätzungsweises Urteil über

ist aber selbst nicht wahrnehmbar.

die Gleichheit oder relative Länge von Zeiträumen. Allein dieses subjektive Zeitgefühl ist so ungenau und schwankend, es ist so vielen Störungen, ja, vollständigen Hemmungen ausgesetzt, daß darauf unmöglich ein genaues Zeitmaß begründet werden kann.

Definition eines physischen Zeitmaßes.

Zu einem zuverlässigen Zeitmaß gelangen wir durch die Anwendung eines Satzes, der sich direkt aus dem Kausalitätsbegriff ergibt: Wir nennen zwei Zeiträume gleich, wenn sich in ihnen dieselbe physikalische Veränderung unter genau denselben Bedingungen abspielt. Man könnte also als solchen Zeitraum, als Zeiteinheit, etwa die Zeit definieren, in der unter ganz genau festgehaltenen äußeren Bedingungen ein Körper einen Meter tief fällt, oder die Zeit, in der sich ein bestimmter auf 100 Grad erhitzter Körper um 10 Grad abkühlt, oder die Zeit, in der sich ein bestimmtes Wassergefäß durch eine kleine Öffnung völlig entleert — letzteres Maß treffen wir tatsächlich im ersten Beginn der Zeitmessung an. Allein alle diese Zeitmaße würden an zwei gemeinsamen Übelständen leiden: erstens wäre die vollkommene Gleichheit der äußeren Bedingungen sehr schwer herzustellen, namentlich wenn die Zeitmessung an ganz verschiedenen Orten vorgenommen werden soll, und zweitens würde jeder Versuch immer nur die Messung einer einzelnen Zeiteinheit ergeben: hat sich das Wassergefäß entleert, so muß man es erst wieder füllen, um eine zweite Messung vornehmen zu können, und die Zeit, die während des Füllens verstreicht, entzieht sich der Messung.

Hieraus ergeben sich unmittelbar die Erfordernisse, die ein physikalischer Vorgang erfüllen muß, wenn er praktisch zur Zeitmessung geeignet sein soll: Erstens muß der Vorgang möglichst einfach und von wenigen Bedingungen abhängig sein, deren Erfüllung sich leicht erreichen und kontrollieren läßt; zweitens muß sich der Vorgang, wenn diese Bedingungen erfüllt sind, nicht nur einmal, sondern von selbst immer wieder in gleicher Weise abspielen, und drittens müssen sich die Zeitpunkte, wann der Vorgang jedesmal abgelaufen ist, scharf beobachten lassen. Die Natur bietet uns eine große Anzahl von Erscheinungen dar, die diese Bedingungen mehr oder weniger vollständig erfüllen, und die deswegen gelegentlich auch alle zur Zeitmessung benutzt werden können. Es sind die sogenannten periodischen Bewegungen und Schwingungen. Durch die Verwendung solcher periodischer Vorgänge erlangt die Zeitmessung vollkommene Ähnlichkeit mit der Messung einer Länge: wie man z. B. zur Messung einer Länge von 68 cm die Längeneinheit von 1 cm 68mal hintereinander abträgt, also die Messung auf eine Zählung der Einheiten zurückführt, ebenso hat man, um einen Zeitraum von 68 Sekunden zu messen, nur 68 Schwingungen eines Sekundenpendels abzuzählen. Die Zählung größerer Mengen von Sekunden wird durch unsere Räderuhren erleichtert, mechanische Zählwerke, die 60 Sekunden zu einer Minute, 3600 Sekunden zu einer Stunde und 86400 Sekunden zu einem Tage zusammenfassen. Unsere verschiedenen Uhren benutzen zur Zeitmessung Schwingungserscheinungen, deren halbe Periodendauer in der Nähe von einer Sekunde liegt; sie

Praktische Zeitmaße bilden die periodischen Bewegungen.

beträgt $^1/_5$ Sekunde bei den gewöhnlichen Taschenuhren und steigt bis auf etwa 3 Sekunden bei Turmuhren. Schwingungen von längerer Dauer, etwa von einer Minute oder gar einer Stunde, werden zur Zeitmessung nicht benutzt, da bei ihnen, obwohl sie physikalisch herstellbar wären, die vollkommene Gleichmäßigkeit schwerer zu erreichen ist. Wesentlich raschere Schwingungen, bis zu mehreren hundert in einer Sekunde, werden nur bei besonderen physikalischen Versuchen zur Zeitmessung verwendet, wo es sich darum handelt, kurze Zeiträume sehr genau zu messen; statt des Pendels werden dann die Vibrationen einer Stimmgabel oder einer Metallfeder benutzt. Alle astronomischen Präzisionsuhren, die die Grundlage jeder exakten Zeitmessung bilden, besitzen Sekundenpendel, d. h. Pendel, die eine halbe Schwingung — von einer Seite zur andern — in einer Sekunde ausführen. Demnach bildet die Sekunde die vorzüglichste, künstliche Zeiteinheit, während die Minute und die Stunde jetzt nur noch des bequemeren Ausdrucks wegen benutzt werden.

Die Sekunde als wichtigste künstliche Zeiteinheit.

Erst der Tag, die von der Natur selbst dargebotene Zeiteinheit, entspricht wieder einem periodischen Vorgang, nämlich der Umdrehung der Erde um ihre Achse, oder vielmehr den hierdurch bedingten Erscheinungen, dem Wechsel von Tag und Nacht, dem Auf- und Untergang der Sonne oder der Sterne. Entsprechend den oben für die Brauchbarkeit eines Zeitmaßes aufgestellten Bedingungen haben wir nun sowohl für die künstliche Zeiteinheit, die Sekunde, als auch für die natürliche, den Tag, zu prüfen, ob auch die äußern Verhältnisse, unter denen sich die periodischen Vorgänge immer wieder erneuern, hinreichend konstant bleiben, so daß wir uns auf die Unveränderlichkeit dieser zwei Zeiteinheiten verlassen dürfen. Zunächst beschäftigen wir uns mit der natürlichen Zeiteinheit, dem Tage.

Der Tag als wichtigste natürliche Zeiteinheit.

Jeder glaubt wohl zu wissen, was ein Tag ist, und doch ist eine genaue Definition dieser Zeiteinheit durchaus nicht so einfach. Das Grundphänomen für die Entstehung des Tages ist bekanntlich die Rotation der Erde um ihre Achse. Aber schon wenn wir die Dauer einer Umdrehung, die uns hier allein interessiert, genau definieren wollen, begegnen wir den größten Schwierigkeiten. Bei einem sich gleichmäßig um seine Achse drehenden Rade ist es selbstverständlich, was man unter der Umdrehungszeit zu verstehen hat; der Zeiger einer Uhr hat eine Umdrehung vollendet, wenn er wieder zu demselben festen Punkte des Zifferblattes zurückgekehrt ist. Aber im Weltenraume gibt es keinen festen Punkt, von dem man die Drehung der Erde messen könnte, und die Achse, um die sich die Erde dreht, liegt weder im Raume noch auch im Erdkörper selbst unveränderlich fest. Das Problem der Erdrotation bildet einen speziellen Fall der allgemeinen freien Rotation eines Körpers; es ist mathematisch von hohem Interesse und vielfach behandelt worden. An dieser Stelle können nur die wichtigsten Ergebnisse dieser theoretischen Untersuchungen, soweit sie für die Zeitmessung in Betracht kommen, mitgeteilt werden.

Schwierigkeit der genauen Definition des Tages.

Die freie Rotation eines starren Körpers.

Für alle festen und starren Körper, welche Gestalt sie auch haben

Der Schwerpunkt.

mögen, gelten eine Anzahl ganz allgemeiner Gesetze. Zunächst besitzt jeder solche Körper einen Schwerpunkt, der eine zu den Teilen des Körpers unveränderliche Lage hat; unterstützt man den Körper im Schwerpunkt, wie es bei hinreichend leichten Gegenständen, etwa auf einer Nadelspitze, die man im Schwerpunkt einsetzt, geschehen kann, so befindet sich der Körper in jeder beliebigen Lage im Gleichgewicht, er hat nicht das Bestreben sich noch zu drehen; das mag als die Definition des Schwerpunktes dienen, wenn man keine mathematischen Formeln gebrauchen will. Wird ein vollkommen freier, also nirgends unterstützter, starrer Körper, etwa ein geworfener Stein, in Rotation versetzt, so dreht er sich stets um eine gerade Linie, die durch seinen Schwerpunkt geht. Der Schwerpunkt selbst hat, wenn auf den Körper keine äußeren Kräfte, wie z. B. die Anziehungskraft der Erde oder der Luftwiderstand, wirken, nur infolge des anfänglichen Stoßes eine geradlinige, gleichförmige Bewegung; die Rotation dagegen bewegt den Schwerpunkt gar nicht, da sie, wie gesagt, um eine durch diesen Punkt gehende Gerade stattfindet. Diese Gerade nennt man die Drehungs- oder Rotationsachse. Im allgemeinen liegt die Drehungsachse jedoch nicht in dem Körper fest, sondern nur ein Punkt derselben, eben der Schwerpunkt, bleibt fest mit dem Körper verbunden, während ihre Richtung sich innerhalb des rotierenden Körpers fortwährend verändert. Da die Rotationsachse somit in jedem Augenblicke eine andere ist, kann man eigentlich gar nicht mehr von einer einzigen Drehungsachse sprechen; man bezeichnet die Gerade, um die sich der Körper in jedem Augenblicke dreht, als die augenblickliche, momentane oder instantane Rotationsachse.

Die momentane Drehungsachse.

Denken wir uns nun wieder eine beliebige, im Körper feste, durch den Schwerpunkt gehende gerade Linie, so können wir von jedem einzelnen Massenteilchen des Körpers ein Lot auf diese Gerade fällen, dessen Länge also den Abstand des Teilchens von der Geraden bestimmt. Multiplizieren wir nun die Masse jedes Teilchens mit dem Quadrate seines Abstandes von der Geraden und addieren alle so für sämtliche Massenteilchen des Körpers berechneten Produkte, so ergibt sich eine Zahl, die man das Trägheitsmoment des Körpers in bezug auf jene Gerade als Trägheitsachse nennt. Denken wir uns die Trägheitsmomente für alle beliebigen durch den Schwerpunkt gehenden Trägheitsachsen berechnet, so zeigt es sich, daß von allen diesen unendlich vielen Achsen drei aufeinander senkrecht stehende dadurch ausgezeichnet sind, daß für sie die Trägheitsmomente die größten oder kleinsten aller überhaupt vorkommenden Werte annehmen. Man nennt diese die drei Hauptträgheitsachsen des betreffenden Körpers. Auch diese Eigenschaften hat jeder beliebige starre Körper. Bei regelmäßig geformten Körpern von gleichmäßig verteilter Dichte kann man oft schon aus der äußeren Gestalt beurteilen, wie ihre Hauptträgheitsachsen liegen. So wird bei allen Rotationskörpern, deren Oberfläche man sich durch die Rotation einer ebenen Kurve um eine in ihrer Ebene liegende Achse entstanden denken kann, stets diese Figurachse auch eine der Hauptträgheitsachsen sein. Dieser Fall trifft

Das Trägheitsmoment.

Die Hauptträgheitsachsen.

nun bei der Erde zu. Die Erde hat nahezu die Gestalt eines abgeplatteten Rotationsellipsoides, d. h. eines Körpers, den man durch Umdrehung einer Ellipse um ihre kleine Achse erhält, und bei diesem fällt die Hauptachse des größten Trägheitsmoments mit der kleinen Achse des Ellipsoids zusammen, die den geographischen Nord- und Südpol der Erde verbindet. Die beiden anderen Hauptträgheitsachsen liegen in der Ebene des Erdäquators, und die ihnen entsprechenden Trägheitsmomente sind gleich.

Begründung der Konstanz der Tageslänge.

Die oben ausgesprochene Regel, daß die Rotationsachse ihre Lage im Körper selbst wechselt, erleidet nur dann eine Ausnahme, wenn sie mit einer der Hauptträgheitsachsen zusammenfällt; in diesem Falle findet dauernd eine gleichmäßige Rotation um diese Achse statt. Bei der Erde ist diese Bedingung nun glücklicherweise so nahe erfüllt, daß erst die schärfsten astronomischen Messungen der letzten Jahrzehnte eine geringfügige Beweglichkeit der Drehungsachse im Erdkörper nachzuweisen vermocht haben. Durch diese Beobachtungen der sogenannten Polhöhenschwankungen ist festgestellt worden, daß sich die instantane Drehungsachse stets innerhalb eines Kreises befindet, den man mit einem Halbmesser von etwa 11 Meter um die Pole des Erdellipsoids beschreibt. Und noch ein anderer Umstand wirkt darauf hin, die Verhältnisse der Erdrotation wesentlich zu vereinfachen: eine Folge der Gleichheit der beiden Trägheitsmomente der äquatorialen Trägheitsachsen ist, wie sich mathematisch zeigen läßt, die vollkommene Konstanz der Drehungsgeschwindigkeit um die dritte, nach den Erdpolen gerichtete Hauptträgheitsachse. Da nun, wie eben gezeigt wurde, die augenblickliche Drehungsachse der Erde stets nur äußerst wenig von dieser polaren Trägheitsachse abweicht, so ergibt sich hieraus eine selbst sehr hohen Anforderungen genügende Gleichmäßigkeit der Erdrotation.

Größte Abweichungen.

Man hat sich vorzustellen, daß die mittlere Dauer eines Tages ganz unveränderlich konstant bleibt; die Dauer eines einzelnen Tages kann aber infolge der Verschiebungen der instantanen Rotationsachse um äußerst kleine Beträge davon verschieden sein, z. B. beträgt für Berlin die größte Änderung der Tageslänge 0,00044 Sekunden, eine Größe, die sich jeder Messung entzieht. Da jedoch diese Abweichungen stets mehrere Monate lang nach derselben Seite hin stattfinden (die Tage sind dauernd zu kurz oder zu lang), so addieren sie sich, so daß schließlich die Bestimmung eines absoluten Zeitpunktes um einen größeren Betrag fehlerhaft wird. Allein auch dieser Fehler kann gewisse, sehr enge Grenzen nicht überschreiten, er beträgt z. B. für Berlin $\pm$ 0^s,033, für Hammerfest $\pm$ 0^s,074. Nach dem Erdäquator zu werden diese Zeitfehler immer kleiner, nach den Polen hin jedoch immer größer, und innerhalb des oben erwähnten Kreises von 22 Meter Durchmesser können sie geradezu ungeheuerliche Beträge annehmen: die Dauer eines Tages — wenn wir ihn in der bei uns üblichen Weise definieren wollten — kann dort bis zu 12 Stunden verändert werden, und das Jahr hat für gewisse Punkte innerhalb jenes Kreises nicht 365, sondern 366, das Schaltjahr 367 solcher Tage, die dann natürlich entsprechend kürzer als unsere Tage sein

müssen. Diese Paradoxa zeigen nur, daß in so unmittelbarer Nähe der Rotationspole die übliche Definition des Tages, von der gleich noch die Rede sein wird, ihre Brauchbarkeit verliert. In allen Kulturländern sind jedoch, wie wir gesehen haben, keinerlei Schwierigkeiten für die Zeitmessung aus den Folgen der Bewegung der Rotationsachse im Erdkörper zu befürchten.

Einfluß äußerer Kräfte:

Das bisher Gesagte bezog sich nur auf die freie Rotation der Erde, wie sie stattfinden würde, wenn keine Kräfte von außen auf sie einwirkten. Durch die Anziehung der anderen Himmelskörper, insbesondere des Mondes und der Sonne, werden die Verhältnisse aber wesentlich geändert. Diese äußeren Einwirkungen haben zwei ganz verschiedene Erscheinungen zur Folge, beide so auffällig, daß sie schon im Altertum bekannt waren: die Erscheinungen

Flutreibung,

der Ebbe und Flut und der Präzession. Die Gezeiten, die Ebbe und Flut, bestehen, wenn wir von dem in Wirklichkeit recht komplizierten Verlaufe absehen, in der Hauptsache darin, daß sich das Meer infolge der Anziehung des Mondes auf der Verbindungslinie Erde-Mond zu beiden Seiten der Erde erhebt, zwei hohe Wellenberge, die Flut, bildet, während es senkrecht dazu, also an Orten, wo der Mond im Horizont erscheint, seinen tiefsten Stand, die Ebbe, hat. Ähnliche, aber niedrigere Wellen erzeugt die Anziehung der Sonne. Da diese Flutwellen mit Mond und Sonne von Osten nach Westen um die Erde wandern, so wirken sie durch ihre Reibung verzögernd auf die Drehung der Erde. G. H. Darwin folgert, daß sich die Dauer des Tages infolge der Flutreibung von einem anfänglichen Betrage von etwa 4 Stunden bis auf die jetzigen 24 Stunden verlängert habe, und daß diese Verlangsamung der Rotation noch fortdauert, bis sie endlich einen Maximalwert von 55 Tagen erreicht. Dieser Prozeß der Verlängerung des Tages bis zur Dauer von 2 der jetzigen Monate erfolgt jedoch erst im Laufe von vielen

Aufsturz meteorischer Massen,

Millionen Jahren. Im gleichen Sinne wirkt auch noch ein anderer Vorgang. Täglich stürzen kleinere oder größere kosmische Massen auf die Erde, sie vermehren andauernd die Masse der Erde und müssen dadurch eine Verlangsamung der Rotation herbeiführen.

Abkühlung und Verwitterung.

Demgegenüber haben wir von der fortschreitenden Abkühlung und Verwitterung der Erde eine Beschleunigung der Achsendrehung zu erwarten. Die direkte thermische Zusammenziehung der die jetzige Erdkruste bildenden Gesteine kommt dabei allerdings kaum in Betracht. Aber Verwitterung, Erosion und Einstürze sind ununterbrochen tätig, an der Erdoberfläche wie im Erdinnern Gesteins- und Wassermassen an tiefer liegende Orte zu befördern. Das Erdinnere enthält zahlreiche mit heißen, gespannten Dämpfen erfüllte Höhlungen. Wo der Druck dieser Dämpfe durch Abkühlung schwindet, da können wiederum Wasser- und Erdmassen aus höheren Schichten einbrechen, und durch alle diese Vorgänge werden die Trägheitsmomente der Erde verkleinert und ihre Umdrehung beschleunigt. Auch der durch die Sonnenwärme verursachte Kreislauf des Wassers und die Wärmeausstrahlung der Erde sind daher in diesem Sinne zu den äußeren auf die Erde einwirkenden Kräften zu rechnen.

Praktische Prüfung der Konstanz des Tages.

Welche dieser Erscheinungen jetzt überwiegt, ob die Verlängerung oder die Verkürzung der Tagesdauer, läßt sich nach dem augenblicklichen Stande der astronomischen Erfahrung durchaus nicht entscheiden. Um durch direkte Beobachtungen die Gleichmäßigkeit der Tageslänge zu kontrollieren, muß man sich nach ähnlichen periodischen Bewegungsvorgängen außerhalb der Erde umsehen. Eine Zeit lang hat man geglaubt, die Umlaufszeit des Mondes um die Erde hierzu verwenden zu können. Aus Zeiten, die über 2000 Jahre zurückliegen, sind uns historisch verbürgte Nachrichten über Sonnen- und Mondfinsternisse erhalten. Rechnen wir mit den uns jetzt bekannten Elementen der Mondbewegung diese Finsternisse nach, so müßten sich, wenn die Länge der Tage inzwischen auch nur um einzelne Sekunden zu- oder abgenommen hätte, merkliche Abweichungen zeigen. Allein die Theorie der Mondbewegung ist selbst so kompliziert, daß wir die Umlaufszeit unseres Satelliten nicht mit dem hier nötigen Grade von Genauigkeit als bekannt voraussetzen dürfen. Theoretisch zeigt es sich vielmehr, daß mit der durch die Flutreibung bewirkten Verlangsamung der Erdrotation auch stets eine Veränderung der Umlaufszeit des Mondes parallel laufen muß, so daß wir unmöglich die eine Erscheinung zur Kontrolle der andern heranziehen dürfen. Erst die Gesamtheit der Bewegungsvorgänge in unserm Sonnensystem liefert uns eine kräftige Stütze für die Überzeugung, daß seit historischen Zeiten eine merkliche Änderung der Tageslänge nicht eingetreten ist. Alle diese Bewegungen messen wir durch unsern mittleren Tag. Wäre nun letzterer nicht von konstanter Dauer, so müßten die Beobachtungen aller Planeten und Satelliten im gleichen Sinne von den Berechnungen abweichen. Nicht ein einziges Mal hat sich eine Spur einer solchen Erscheinung gezeigt, und so müssen wir sagen, daß bisher keinerlei Veränderung der Tageslänge hat nachgewiesen werden können.

Die Präzession.

Die zweite durch die Einwirkung von Sonne und Mond auf die rotierende Erde hervorgerufene Erscheinung ist die schon von Hipparch (ca. 150 v. Chr.) entdeckte Präzession. Ohne solche äußere Störung würde die Rotationsachse der Erde im Raume eine so gut wie unveränderliche Richtung beibehalten. Der Erdäquator bildet mit der Ekliptik, der Ebene der Bahn, die die Erde um die Sonne im Laufe eines Jahres beschreibt, einen Winkel von etwa $23\frac{1}{2}^0$, den man die Schiefe der Ekliptik nennt; die Gerade, in der sich die Ekliptik und der Äquator schneiden, heißt die Knotenlinie, und die Punkte, in denen diese die Himmelskugel trifft, sind der Frühlings- und Herbstpunkt, so genannt, weil die Stellung der Sonne in diesen Punkten den Anfang des astronomischen Frühlings und Herbstes (21. März und 23. September) bezeichnet. Die Anziehung der Sonne, die sich genau, und des Mondes, der sich sehr nahe in der Ebene der Ekliptik bewegt, wirkt nun dahin, die Äquatorebene in die Ekliptik hineinzuziehen, also die Schiefe zu vermindern, was auch erreicht werden würde, wenn die Erde nicht rotierte. Infolge der Rotation tritt aber eine Erscheinung ein, die wir täglich an einem Kinderspielzeug, dem Kreisel, beobachten können. Die Schwerkraft sucht den auf seiner Spitze

Die Ekliptik.

Der Frühlingspunkt.

Präzessionsbewegung des Kreisels, tanzenden Kreisel umzuwerfen; aber solange er rasch rotiert, ist das unmöglich, vielmehr nimmt seine gegen die Vertikale geneigte Rotationsachse eine langsame Bewegung um die Vertikale herum an, wobei der Neigungswinkel gegen die Vertikale unverändert erhalten bleibt und die Richtung dieser sogenannten Präzessionsbewegung der Achse um die Vertikale mit der Rotationsrichtung des Kreisels selbst übereinstimmt. Ganz ähnlich verhält es sich

der Erde. mit der Bewegung der Erdachse. Wegen der Erdrotation gelingt es der vereinten Anziehung der Sonne und des Mondes nicht, den Äquator in die Ekliptik hineinzuziehen, vielmehr nimmt die Erdachse bei konstant bleibender Schiefe eine langsame Präzessionsbewegung um die Pole der Ekliptik an. Da aber diese Anziehung die Rotationsachse nicht, wie beim Kreisel, umzuwerfen, sondern vielmehr aufzurichten sucht, so hat die Präzession der Erdachse die zur Erdrotation entgegengesetzte Richtung: der Nordpol der Erde bewegt sich von Osten nach Westen um den Ekliptikpol herum, und dieselbe Bewegung hat der Frühlingspunkt in der Ekliptik. Die Präzession beträgt jährlich etwa 50 Bogensekunden, so daß der Frühlingspunkt erst in 26 000 Jahren einen ganzen Umlauf vollendet.

Die Nutation. Aber das sind zunächst nur die gröbsten Züge der räumlichen Bewegung der Erdachse. Sonne und Mond stehen nicht immer in konstanter Entfernung von der Erde, so daß die Kraft ihrer Anziehung auf das Erdellipsoid veränderlich ist. Der Mond bewegt sich nicht, wie bisher angenommen, in der Ebene der Ekliptik, sondern in einer etwa 5 Grad dagegen geneigten Bahn, die selbst wieder, infolge der Sonnenanziehung, eine Präzessionsbewegung in 18,6 Jahren um den Pol der Ekliptik ausführt. Um den Pol dieser veränderlichen Mondbahn findet daher eigentlich der von der Mondanziehung herrührende Teil der Präzession der Erdachse und des Frühlingspunktes statt. Man sieht, daß zu der fortschreitenden Präzession aus allen diesen Ursachen noch eine Menge periodisch veränderliche Glieder hinzukommen müssen; die theoretische Astronomie hat diese sämtlich genau berechnet und faßt sie unter dem Namen Nutation zusammen. Endlich liegt auch die Ekliptik selbst im Raume nicht fest, sondern vollführt unter dem Einflusse der Anziehung der übrigen Planeten ebenfalls sehr geringe präzessionsartige Bewegungen, die zwar nicht die Lage der Erdachse im Raume, aber doch den Betrag der Schiefe und die Lage des Frühlingspunktes beeinflussen.

Aus dem Gesagten erkennt man, wie große Schwierigkeiten sich einer exakten Definition eines Sterntages, der Umdrehungszeit der Erde in bezug auf eine im Raume feste Richtung, entgegenstellen. Eine unter den Fixsternen feste Richtung ist hierzu nicht geeignet, da sich die Stellung aller Fixsterne in bezug auf die Erdachse wegen der Präzession ungleichförmig verändert, selbst wenn man die Präzession des Frühlingspunktes als gleichförmig an-

Der mittlere Frühlingspunkt. nimmt. Nur der Frühlingspunkt selbst (oder der Herbstpunkt, den man ebensogut benutzen könnte) behält gegen die Erdachse eine feste Lage bei, da er immer in ihrem Äquator liegt. Faßt man unter der Präzession des Frühlingspunktes alle mit der Zeit gleichmäßig fortschreitenden Glieder seiner

Bewegung, unter der Nutation alle periodischen Glieder zusammen, so hat der nur mit der Präzession behaftete, aber von der Nutation befreite, sogenannte „mittlere“ Frühlingspunkt eine im Raume gleichförmig veränderliche Richtung, und die Stellung der gleichförmig rotierenden Erde gegen diese ebenfalls gleichförmig veränderliche Marke darf nach dem oben Gesagten als ein Maß für die Zeit selbst benutzt werden.

Hiermit sind nun auch die Hauptschwierigkeiten überwunden, die sich der Festsetzung des astronomischen Zeitbegriffs entgegenstellten: Am Himmel haben wir eine zur Zeitmessung geeignete Marke gefunden, und es ist nun nur noch eine ähnliche Festsetzung für die Erdoberfläche zu treffen. Hierzu mögen einige Definitionen teils in das Gedächtnis zurückgerufen, teils schärfer bestimmt werden. Als den Meridian eines Ortes bezeichnet man gewöhnlich diejenige Ebene, die durch die Erdachse und den Beobachtungsort gelegt wird. Das ist aber nicht streng richtig. Die Meridianebene ist in erster Linie eine Vertikalebene, d. h. eine Ebene, die durch die Vertikallinie des Beobachtungsortes gelegt wird. Die Vertikallinien schneiden aber im allgemeinen die Erdachse nicht, sondern gehen in geringen Abständen an ihr vorbei, eine Folge der sogenannten Lotabweichungen, die ihren Grund in den zufälligen Massenverteilungen, Bergen und Tälern der Erdoberfläche haben. Daher ist es auch gar nicht möglich, durch diese beiden sich nicht schneidenden Geraden eine Ebene zu legen. Nun kann man aber durch den Beobachtungsort eine Gerade legen, die der Rotationsachse der Erde parallel ist und die daher das unendlich ferne Himmelsgewölbe in genau denselben Himmelspolen trifft, durch die auch die Erdachse selbst geht; wir können diese Parallele als die lokale Weltachse bezeichnen. Wegen der großen Entfernung der Fixsterne vollziehen sich ihre durch die Erdrotation verursachten scheinbaren Bewegungen genau so, als ob die Rotation um die lokale Weltachse stattfände; nur bei der Sonne, dem Monde und den Planeten ergeben sich geringe Unterschiede, die der Astronom als „tägliche Parallaxe“ dieser Himmelskörper in Rechnung zieht. Durch diese lokale Weltachse und die Vertikallinie wird nun die Meridianebene jedes Beobachtungsortes bestimmt.

Der Meridian.

Da die Rotationsachse im Erdkörper nicht unveränderlich festliegt, so muß auch die ihr parallele lokale Achse und mit dieser die Meridianebene kleine Ortsveränderungen erleiden. Wir sahen oben, daß der Einfluß dieser geringfügigen Lageänderungen der Rotationsachse auf die Zeit in allen Kulturländern vernachlässigt werden darf. Noch kleiner sind die erst in der letzten Zeit nachgewiesenen Richtungsänderungen der Lotlinie, die im Laufe eines Tages durch die veränderliche Stellung des Mondes und der Sonne verursacht werden. Sehen wir daher auch hiervon ab, so ist die Meridianebene an jedem Orte eine mit dem Erdkörper unveränderlich fest verbundene Ebene, die durch die lokale Weltachse und die Vertikallinie des Ortes geht. In unmittelbarer Nähe der Erdpole bilden die letztgenannten beiden Linien einen sehr kleinen Winkel miteinander, und daher kommt es, daß

Lagenänderungen des Meridians.

dann eine geringfügige Verschiebung der einen sehr große Änderungen der Lage der Meridianebene bewirken kann. Fallen beide Linien genau zusammen, so wird die Lage des Meridians und mit ihr die Ortszeit überhaupt unbestimmbar. In dem Augenblick, da die bewegliche, momentane Rotationsachse durch einen Punkt der Erdoberfläche hindurchwandert, ändert sich dessen Ortszeit plötzlich um zwölf Stunden; schon in der Nähe der Achse wird die Ortszeit schwer bestimmbar.

Der Stundenwinkel.

An den Meridian knüpft unmittelbar die astronomische Definition der Zeit an. Legt man eine Ebene durch irgendeinen Stern und die Weltachse, so ist dies die Ebene des „Stundenkreises" dieses Sterns; den Winkel, den sie mit dem Stundenkreise des Frühlingspunktes bildet, nennt man die „Rektaszension" (α) des Sterns, und den Winkel, den der Stundenkreis des Sterns mit dem Meridiane eines bestimmten Erdortes bildet, den Stundenwinkel (τ) des Sterns an diesem Orte. Man erkennt sofort, daß der Stundenwinkel infolge der Erdrotation im Laufe eines Tages alle Werte von 0^0 bis 360^0 durchlaufen muß, und zwar findet seine Zunahme genau proportional der Erdrotation, d. h. nach dem oben Ausgeführten völlig gleichförmig statt. Der Stundenwinkel ist daher vorzüglich als Zeitmaß geeignet und nach der astronomischen Definition ist die Zeit geradezu mit dem Stundenwinkel gewisser

Die Sternzeit.

Punkte des Himmels identisch: die Sternzeit (θ) ist der Stundenwinkel des Frühlingspunktes, die wahre Sonnenzeit (w) der Stundenwinkel des Mittelpunktes der Sonnenscheibe. Würde man die Sternzeit als den Stundenwinkel des von der Nutation freien „mittleren" Frühlingspunktes definieren, so wäre sie nach dem oben Gesagten ein vollkommen gleichförmiges Zeitmaß. Aus praktischen Rücksichten versteht man jedoch unter Sternzeit den Stundenwinkel des mit der Nutation behafteten „wahren" Frühlingspunktes, und die Sternzeit verläuft daher nicht vollkommen gleichförmig. Diese Unregelmäßigkeit ist jedoch so gering, daß sie für gewöhnlich gar nicht beachtet zu werden braucht. Das größte Glied der Nutation ist $1^s,15 \sin K$, wobei K die Entfernung des Knotens der Mondbahn vom Frühlingspunkte bezeichnet. Da nun die Mondknoten, wie schon erwähnt, in 18,6 Jahren einen ganzen Umlauf vollenden, so nimmt in dieser Zeit obiges Glied einmal den Betrag $+ 1^s,15$, dann nach 9,3 Jahren den Betrag $- 1^s,15$ an. Denken wir uns eine ideal gleichförmig gehende Sternzeituhr, so würde diese daher im Laufe von 18,6 Jahren einmal um obigen Betrag vor- und nachzugehen scheinen. Da jedoch die Sternzeit lediglich bei der Berechnung astronomischer Beobachtungen innerhalb kurzer Zeiträume, eigentlich nur innerhalb eines Tages, benutzt wird, so verliert die erwähnte geringe Ungleichförmigkeit jede Bedeutung.

Die wahre Sonnenzeit.

Zu allen absoluten Zeitangaben, bei denen es darauf ankommt, beliebig weit voneinander entfernte Zeitpunkte in Beziehung zu setzen, bedient man sich nur der „mittleren Sonnenzeit", die von allen Unregelmäßigkeiten befreit, ein nach unsern jetzigen Kenntnissen völlig gleichförmiges Zeitmaß darstellt. Die historische Betrachtung dieses Abschnittes hatte uns (S. 102) bis

zu der Zeit geführt, wo sich die Rechnung nach wahrer Sonnenzeit allgemeine Geltung verschafft hatte. Es war 12 Uhr mittags, wenn die Sonne durch den Meridian des Ortes ging, wenn sie „kulminierte“. Von da an wurden bis zur nächsten Kulmination zweimal 12 gleich lange Stunden wahrer Sonnenzeit gezählt. Diese wahre Sonnenzeit ist jedoch kein gleichförmiges Zeitmaß. Durch unsere bisherigen Betrachtungen ist festgestellt, daß der Stundenwinkel des mittleren Frühlingspunktes gleichmäßig mit der Zeit wächst und sich daher zur Messung der Zeit eignet. Dasselbe gilt auch von jedem Punkte des Himmels, dessen Rektaszension gleichmäßig veränderlich ist, da auch der Stundenwinkel solcher Punkte gleichförmig wachsen muß. Nun ist aber die Bewegung der Sonne in Rektaszension — das Spiegelbild der Bewegung der Erde — durchaus nicht gleichmäßig. Erstens bewegt sich die Sonne nicht längs des Äquators, sondern längs der gegen ihn um $23\frac{1}{2}$ Grad geneigten Ekliptik. Selbst wenn die Bewegung in der Ekliptik gleichmäßig wäre, so müßte doch die Rektaszension zu den beiden Zeitpunkten, wo die Bewegung dem Äquator parallel erfolgt (21. Juni und 21. Dezember) am raschesten zunehmen, am langsamsten dagegen zu den Zeiten, wo die Sonnenbewegung den größten Winkel mit dem Äquator bildet, d. i. im Frühlings- und Herbstpunkte. Dazu kommt aber zweitens noch, daß sich die Sonne auch in der Ekliptik nicht gleichförmig bewegt. Der größte Teil der Ungleichförmigkeit dieser Bewegung rührt davon her, daß die Erde im Laufe eines Jahres eine elliptische Bahn um die Sonne beschreibt, in der sie am 31. Dezember der Sonne am nächsten steht (Perihel), während am 2. Juli die Entfernung am größten ist (Aphel). Im Perihel ist die Bewegung am raschesten, im Aphel am langsamsten. Dazu kommen dann noch alle die Störungen, die die Bewegung der Erde durch die Anziehung der übrigen Planeten und namentlich des Mondes erleidet. Alle diese Ursachen wirken zusammen, um die Änderung der Sonnenrektaszension und folglich auch die Dauer der wahren Sonnentage ungleichmäßig zu machen.

Die mittlere Sonnenzeit.

Man hat nun folgende Betrachtung angestellt, um von dieser ungleichförmigen wahren zur gleichförmigen „mittleren“ Sonnenzeit zu gelangen. Man denkt sich außer der wahren Sonne noch eine fingierte „erste mittlere Sonne“ in der Ekliptik laufend, deren Bewegung vollkommen gleichmäßig und so beschaffen ist, daß diese fingierte Sonne gleichzeitig mit der wirklichen durch das Perihel (und auch Aphel) geht. Zu diesem Zwecke muß die Umlaufszeit der fingierten Sonne gleich der mittleren Umlaufszeit der Erde um die Sonne sein. Diese erste mittlere Sonne, die sich in der Ekliptik gleichförmig bewegt, wird zu zwei genau ein halbes Jahr voneinander entfernten Zeitpunkten den Äquator im Frühlings- und Herbstpunkte durchschreiten. Man denkt sich nun noch eine „zweite mittlere Sonne“, die genau dieselbe Umlaufszeit wie die erste besitzt, sich jedoch im Himmelsäquator bewegt, und zwar so, daß sie immer gleichzeitig mit der ersten im Frühlings- und Herbstpunkte ankommt. Der Stundenwinkel dieser zweiten mittleren Sonne ist das, was wir als „mittlere Sonnenzeit oder Ortszeit“ bezeichnen. Rech-

nerisch läßt sich diese Definition noch einfacher ausdrücken: Der als erste mittlere Sonne bezeichnete Punkt hat die „mittlere Länge" der Sonne, und die Rektaszension der zweiten mittleren Sonne ist gleich dieser mittleren Länge.

Nachdem wir so die Definition der Sternzeit, der wahren und der mittleren Sonnenzeit als Stundenwinkel des Frühlingspunktes, der wirklichen und der zweiten mittleren Sonne kennen gelernt haben, ist es leicht, die Beziehungen aufzustellen, die zwischen diesen drei Zeitmaßen bestehen. Aus der oben gegebenen Definition der Sternzeit θ sowie der Rektaszension α und des Stundenwinkels τ eines beliebigen Himmelspunktes P, die durch nebenstehende Fig. 1 nochmals vor Augen geführt wird, ergibt sich sofort die fundamentale Beziehung

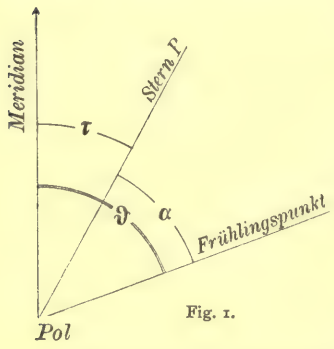


Fig. 1.

$$\tau = \theta - \alpha$$

Setzen wir hierin $\tau = 0$, so folgt, daß die Sternzeit stets gleich der Rektaszension der gerade kulminierenden Sterne ist. Darauf gründet sich die wichtigste Methode der astronomischen Zeitbestimmung mittels der Durchgangsinstrumente im Meridian.

Nennen wir ferner w die wahre Zeit, m die mittlere Zeit, $\alpha_\odot$ die Rektaszension des Sonnenmittelpunktes und L die mittlere Länge der Sonne, so ergeben obige Definitionen sofort die Beziehungen

$$w = \theta - \alpha_\odot$$

$$m = \theta - L$$

Aus der letzten Gleichung folgt, wenn wir die Sternzeit im mittleren Mittage mit θ_0 bezeichnen,

$$\theta_0 = L$$

Die Zeitgleichung.

Den Unterschied mittlere Zeit minus wahre Zeit nennt man die „Zeitgleichung" z, und man hat daher noch

$$m - w = z = \alpha_\odot - L = \alpha_\odot - \theta_0$$

Die Zeitgleichung, die in astronomischen Kalendern für jeden Tag angegeben wird, ist zu der wahren Zeit, wie sie etwa eine Sonnenuhr angibt, zu addieren, um die mittlere Ortszeit zu erhalten. Sie schwankt im Laufe des Jahres um etwa eine halbe Stunde hin und her, nimmt aber in verschiedenen Jahren an denselben Tagen wenigstens näherungsweise wieder dieselben Werte an. Zur Erläuterung möge folgende Zusammenstellung dienen, die die Grenzwerte der Zeitgleichung in den Jahren 1912 und 1914 für den mittleren Berliner Mittag enthält:

	1912	1914
1. Januar . . .	+ 3m 12s,19	+ 3m 26s,17
12. Februar . . .	+ 14 26,01	+ 14 25,15
16. April . . .	— 0 8,27	— 0 2,18
15. Mai	— 3 48,30	— 3 49,22
14. Juni	— 0 2,16	— 0 8,92
27. Juli	+ 6 19,13	+ 6 19,87
1. September . .	— 0 0,83	+ 0 9,71
3. November . .	— 16 22,20	— 16 21,20
25. Dezember . .	+ 0 7,41	— 0 7,53

Mitte Februar hat also die Sonne fast eine Viertelstunde nach dem mittleren Mittage erst ihren höchsten Stand, und die Nachmittage sind daher fast eine halbe Stunde länger als die Vormittage; umgekehrt ist es im November, wo die Nachmittage bis über eine halbe Stunde kürzer als die Vormittage sind. Das macht sich selbst im bürgerlichen Leben schon bemerklich: Im November klagt man oft, daß es so früh Nacht wird, und im Januar und Februar, daß es gar nicht Tag werden will. Nur bei sehr mäßigen Ansprüchen an die Genauigkeit der Zeitbestimmung — wenn es etwa nur auf die halbe Minute ankommt — darf man ein und dieselbe Tabelle der Zeitgleichung für alle Jahre benutzen; richtiger ist es, stets die für jedes Jahr besonders berechneten Werte anzuwenden.

Beziehung der Sternzeit zur mittleren Zeit.

Das Verhältnis der Sternzeit zur mittleren Zeit ergibt sich aus folgender Überlegung. Die zweite mittlere Sonne vollführt in bezug auf den Frühlingspunkt einen Umlauf um den ganzen Äquator in einem tropischen Jahre oder 365,242199 mittleren Sonnentagen, und zwar findet diese Bewegung von Westen nach Osten, im Sinne der Erdrotation, statt. Das kommt auf dasselbe hinaus, als ob der Frühlingspunkt in derselben Zeit einen Umlauf in der entgegengesetzten Richtung ausführte, und er muß daher in dieser Zeit genau einmal mehr durch den Meridian gehen als die mittlere Sonne, das tropische Jahr muß einen Sterntag mehr erhalten als mittlere Tage. Daraus folgt die Beziehung

$$366{,}242199 \text{ Sterntage} = 365{,}242199 \text{ mittlere Tage},$$
$$1 \text{ Sterntag} = 23^h\,56^m\,4^s{,}0905 \text{ mittlere Zeit}.$$

Der Frühlingspunkt kulminiert also jeden Tag um $3^m\,55^s{,}9095$ früher, man nennt dies die Akzeleration des Frühlingspunktes oder der Fixsterne.

Um ein in Sternzeit gegebenes Zeitintervall in mittlere Zeit zu verwandeln, hat man

von jedem Tage . .	$3^m\,55^s{,}909$
von jeder Stunde .	$9^s{,}830$
von jeder Minute .	$0^s{,}164$

zu subtrahieren. Ist dagegen ein in Sternzeit gegebener Zeitpunkt θ in mittlerer Zeit auszudrücken, so zieht man zunächst von θ die Sternzeit θ_0 im mittleren Mittag ab, die in den astronomischen Ephemeriden für jeden Tag

berechnet ist, und überträgt dann das Sternzeitintervall $\theta - \theta_0$ nach der eben angegebenen Regel in mittlere Zeit. Auch für diese in der astronomischen Praxis sehr häufige Umrechnung gibt es bequeme Hilfstafeln.

Genäherte Umrechnung im Kopfe

Um ohne solche Hilfstafel zu jeder gegebenen mittleren Zeit die entsprechende Sternzeit oder umgekehrt im Kopfe näherungsweise zu berechnen, hat man sich nur zu erinnern, daß es am 21. März, wenn die Sonne im Frühlingspunkte steht, im wahren Mittage (oder unter Berücksichtigung der Zeitgleichung, am 23. März im mittleren Mittage) auch 0^h Sternzeit ist, und daß diese in jedem Monat um zwei Stunden, an jedem Tag um 4^m vorwärtsschreitet. Auf diese Art kann man leicht die Sternzeit θ_0 im mittleren Mittage jedes beliebigen Tages auf einige Minuten genau finden. Will man z. B. wissen, wieviel Sternzeit es am 28. Juli abends 11^h mittlerer Zeit ist, so hat man

23. März bis 23. Juli = 4 Monate	8^h
bis 28. Juli = 5 Tage	20^m
bis 11^h = 0,5 Tage	2^m
also Sternzeit im mittleren Mittage	$8^h\,22^m$
und um 11^h abends	$19^h\,22^m$.

Da die Sternzeit gleich der Rektaszension der im Süden kulminierenden Gestirne ist, gibt diese einfache Rechnung auch zu jeder Zeit sofort Aufschluß über die Stellung des Sternhimmels.

Zeitbestimmung ohne Instrumente.

III. Die instrumentellen Hilfsmittel und die praktische Ausführung der Zeitmessung. a) Die älteren Methoden. Nur ganz rohe und primitive Zeitbestimmungen lassen sich ohne alle Instrumente ausführen. Wer mit dem Sternenhimmel vertraut ist, dem gelingt es ohne weiteres, direkt aus der Stellung der Gestirne die Sternzeit etwa auf eine halbe Stunde genau abzulesen. Man bedient sich hierzu am bequemsten des bekannten Sternbildes der Cassiopeia, dessen fünf Hauptsterne die Gestalt eines **W** bilden. Denkt man sich eine gerade Linie vom Polarstern nach dem westlichsten der fünf Sterne (β Cassiopeiae), dem rechten Ende des **W**, gezogen, so ist diese der Zeiger auf der großen Himmelsuhr, deren Zifferblatt man sich um den Polarstern als Mittelpunkt in 24 Stunden geteilt denkt, wobei jedoch die Teilung in umgekehrter Richtung der Zifferblätter unserer Uhren verläuft; man denkt sich also oben, nach dem Zenit zu 0^h, links 6^h, senkrecht unter dem Polarstern 12^h und rechts 18^h. Auf diesem Zifferblatte gibt der nach β Cassiopeiae gerichtete Zeiger direkt die Sternzeit an. Hat man diese gefunden, so ist es leicht, daraus nach dem soeben mitgeteilten Verfahren im Kopfe die mittlere Ortszeit zu berechnen.

Die Sternuhr.

Auch andere Gestirne, deren Lage man sich eingeprägt hat, lassen sich in ähnlicher Weise benutzen, und auf solche Art mag man sich in früheren Zeiten, als man wegen des Mangels der Uhren noch mehr auf die direkte Beobachtung der Sterne angewiesen und daher besser mit ihnen vertraut war, häufig über die ungefähre Zeit orientiert haben. Im Mittelalter verfer-

tigte man für diesen Zweck besondere „Sternuhren", bei denen ein Zeiger in die Richtung bestimmter Sterne durch Vergleichung mit dem Himmel eingestellt wurde, worauf man die Sternzeit aus der Lage des Zeigers an erhabenen Knöpfen auf dem Zifferblatt auch im Dunkeln abzählen konnte. Welche Rolle die Sternbilder des Tierkreises bei den ersten nächtlichen Zeitbestimmungen gespielt haben mögen, wurde oben (S. 97) schon erwähnt.

Die Länge des eigenen Schattens.

Schwieriger ist es, am Tage ohne alle Instrumente die Zeit nach dem Stande der Sonne zu beurteilen. Das von den Griechen benutzte στοιχεῖον, das Maß des eigenen Schattens, dürfte ursprünglich kaum ein eigentliches Zeitmaß gewesen sein, welches zur Einteilung des Tages in bestimmte Teile diente, sondern man benutzte die Angabe der Schattenlänge nur, um bei Verabredungen eine leicht erkennbare Tageszeit zu bezeichnen, z. B. lud man den Freund ein, bei einer Schattenlänge von zwölf Fuß zum Essen zu kommen. Erst später brachte man die Schattenlängen in eine feste Beziehung zur Teilung des Tages in die zwölf Temporalstunden, indem man Tabellen entwarf, die für alle Monate die Schattenlänge für die einzelnen Stunden angaben. Solcher „Stundentafeln", deren Angaben, um sie leicht dem Gedächtnis einprägen zu können, nach ganz einfachen, ziemlich fehlerhaften Regeln gebildet waren, sind uns aus dem Altertum mehrere erhalten geblieben. Auch die Anwendung dieser Tafeln teilte nur den Tag in zwölf Abschnitte ein, die jedoch nicht genau gleich lang waren.

Die antiken Zeitmesser.

Eine Einteilung des Tages in gleichmäßige Stunden ergab sich erst durch die Anwendung besonderer Instrumente, deren wir zwei prinzipiell verschiedene Gruppen zu unterscheiden haben. Die Apparate der ersten Gruppe sind eigentliche astronomische Beobachtungsinstrumente, die eine Bestimmung der Zeit aus der Stellung der Gestirne ermöglichen; dahin gehören neben den oben erwähnten Stern- oder Polaruhren alle Sonnenuhren sowie alle späteren zur astronomischen Zeitbestimmung dienenden Instrumente Die zweite Gruppe umfaßt alle Apparate, die unter Benutzung verschiedener physikalischer Vorgänge zur künstlichen Abmessung gleicher Zeiträume dienen; hierzu sind neben allen Arten der Räderuhren auch die alten Wasser- und Sanduhren zu rechnen.

Der Gnomon.

Das älteste zur Zeitmessung dienende Instrument, ja das älteste astronomische Beobachtungswerkzeug überhaupt, ist der Gnomon, der senkrechte auf einer horizontalen Ebene stehende schattenwerfende Stab. Aus der Länge des Schattens ergab sich die Höhe der Sonne; seine geringste Länge entsprach dem wahren Mittage und fiel Tag für Tag genau in dieselbe Richtung, die des Meridians, so daß man auch aus dem Durchgange des Schattens durch diese Richtungslinie an jedem sonnigen Tage eine Bestimmung des wahren Mittags erhielt. Der Gnomon war schon den Babyloniern bekannt, und in China wurden mit demselben schon 1100 v. Chr. Sonnenhöhen gemessen. Die späteste, vollkommenste Form des Gnomons ist noch in den Mittagslinien italienischer Kirchen (so im Dom zu Florenz, Mailand usw.) erhalten: durch eine kleine Öffnung hoch in einer südlichen Wand tritt ein

dünnes Bündel der Sonnenstrahlen ein und formt ein über den Fußboden wanderndes Bild der Sonne, dessen Antritt an die Mittagslinie sich scharf beobachten läßt. Diese einfache Art der Zeitbestimmung vermag den Augenblick des wahren Mittags auf etwa drei Sekunden genau festzustellen, und sie ist daher auch heute noch in vielen Fällen von Nutzen.

Die antiken Sonnenuhren.

Sollte der Gnomon außerhalb des Mittags zur Bestimmung der Temporalstunden dienen, so mußte man an ihm nicht, wie bei den jetzigen Sonnenuhren, die Richtung, sondern vielmehr die Länge des Schattens ablesen. Da die Temporalstunden den Tagbogen der Sonne zwischen Aufgang und Untergang stets in 12 gleiche Teile teilten, so ergab sich eine besonders einfache Konstruktion des Zifferblattes, wenn man den Schatten der Gnomonspitze nicht auf einer Ebene, sondern auf einer um diese Spitze beschriebenen, unter ihr liegenden Halbkugel auffing. So entstand die antike Sonnenuhr, deren Erfindung dem Chaldäer Berosus zugeschrieben wird. Es sind sowohl Beschreibungen als auch mehrere Exemplare dieser Uhren selbst erhalten, so daß wir über ihre Konstruktion gut unterrichtet sind. Sie bestanden meistens in einer halbkugelförmigen Aushöhlung einer horizontalen Steinplatte, doch kommen auch kegelförmige und andere Auffangflächen vor; in der Mitte der Halbkugel befand sich die schattenwerfende Spitze eines Stiftes. Bei Sonnenaufgang fiel der Schatten der Spitze auf einen Punkt am oberen Rande der Höhlung (im Westen), mit steigender Sonne wanderte er in derselben hinab, erreichte im Mittag seinen in der Meridianebene liegenden tiefsten Stand und wanderte im Laufe des Nachmittags symmetrisch wieder zum Ostrande der Höhlung empor. Damit diese Vorrichtung nun Temporalstunden anzeigte, hatte man nur die vom Schatten im Laufe eines Tags beschriebene Kurve in 12 gleiche Teile zu teilen. Verband man dann die denselben Stunden entsprechenden Punkte aller Tage miteinander, so erhielt man die Stundenlinien der Uhr, an denen die Zeit nach der Stellung der Schattenspitze abzulesen war.

Die modernen Sonnenuhren.

Als man von den Temporalstunden zur wahren Sonnenzeit überging, verlor die antike Sonnenuhr ihre Bedeutung, und seit dieser Zeit verbreitet sich die wohl auch schon den Babyloniern bekannte, noch jetzt übliche Form der Sonnenuhren, bei denen die Zeit durch den Schatten eines zur Erdachse parallelen Stabes angezeigt wird. Dieser Schatten liegt, wie man sofort sieht, in der Ebene des Stundenkreises der Sonne. Da nun zu derselben wahren Zeit die Sonne, wie oben gezeigt wurde, stets wieder in demselben Stundenkreise steht, so wirft der Stab zu derselben wahren Stunde also auch stets wieder denselben Schatten, und man hat nur die Richtung dieses Schattens auf einer beliebigen Fläche an irgendeinem Tage für alle Stunden zu verzeichnen, um dann dauernd an dieser Sonnenuhr direkt die wahre Sonnenzeit ablesen zu können. Schon die arabischen Astronomen hatten die Methoden entwickelt, auf allen möglichen Flächen die Sonnenuhren zu verzeichnen, und seit Sebastian Münsters „Composito horologiorum“ (Basel 1531) und „Fürmalung und künstlich Beschreibung der Horologien“ (Basel 1537)

entstand eine ausgedehnte Literatur über diese Kunst. Die Sonnenuhren wurden, oft in kunstvoller Form, an Kirchen und anderen Gebäuden angebracht oder auf besonderen Pfeilern aufgestellt, aber auch als Taschenuhren konstruiert und dann zur Orientierung mit einem Kompaß versehen.

Der Sonnenring.

Mehr vereinzelt wurden später auch verschiedene andere Instrumente zur Bestimmung der Zeit benutzt: die Sonnenringe, mit Kreisteilungen versehene Metallringe von etwa einem Fuß Durchmesser, die freischwebend gehalten entweder zur Ermittelung der Sonnenhöhe oder auch direkt des Stundenwinkels dienten; das Astrolabium oder Planisphaerium, eine ähnlich den jetzigen drehbaren Sternkarten eingerichtete Scheibe, an der man nur die augenblickliche Lage des Sternhimmels einzustellen hatte, um direkt am geteilten Rande die Sternzeit ablesen zu können. Im 18. Jahrhundert baute man mit Räderwerk versehene Sonnenuhren, bei deren Benutzung man nur einen Zeiger (Diopter) oder ein kleines Fernrohr auf die Sonne zu richten hatte, um dann sofort an Zifferblättern die Stunden und Minuten der wahren Zeit ablesen zu können.

Das Astrolabium.

Die Wasseruhren,

Zur Ergänzung der Angaben der Sonnenuhren bei trübem Wetter und bei Nacht besaß bereits das griechische Altertum als künstliche Zeitmesser die Wasseruhren. Gefäße, aus denen durch eine kleine Öffnung langsam das Wasser ausfloß, wurden nicht nur zur Einteilung des Tages benutzt, sondern hauptsächlich, um bei Gerichtsverhandlungen den Rednern der verschiedenen Parteien gleiche Zeit zuzumessen. Doch erwähnt schon Ptolemäus (V, 14) auch ihre Anwendung bei astronomischen Zeitmessungen. Später wurden die Wasseruhren immer kunstvoller ausgestattet; eine gewisse Berühmtheit hat die von Vitruv beschriebene Wasseruhr des Ctesibius erlangt, die — vielleicht das erste mit Rädern versehene Uhrwerk — das ganze Jahr hindurch die ungleichen Temporalstunden richtig anzeigen sollte. Für den nächtlichen Gebrauch traf man noch im 19. Jahrhundert hier und da die trauliche Öluhr an, ein Öllämpchen, dessen Behälter mit einer Stundenteilung versehen war, und die Anwendung der einst weit verbreiteten Sanduhren ist auch heute, allerdings nur zur Abmessung kurzer Zeiträume, noch nicht ausgestorben.

Öluhren, Sanduhren.

Erste Benutzung der mittleren Zeit.

b) Die Entwicklung der Präzisionsuhren. Doch verlassen wir nun die Zeitmesser der guten alten Zeit, die auch in ihren besten Ausführungen kaum die Minute richtig anzugeben vermochten. Das Bedürfnis nach genaueren Zeitbestimmungen machte sich zuerst im eigenen Betriebe der astronomischen Beobachtungstätigkeit geltend. Die Ungleichförmigkeit der wahren Sonnenzeit hat schon Ptolemäus erkannt. Im dritten Buche des Almagest setzt er auseinander, daß diese Veränderlichkeit des Zeitmaßes vielleicht — nach der Genauigkeit der damaligen Beobachtungen — auf die Erklärung der an der Sonne und „den anderen Planeten“ festgestellten Bewegungen keinen merklichen Einfluß haben würde, dagegen würde beim Monde wegen dessen größerer Geschwindigkeit ein beträchtlicher Fehler entstehen. Daher führte er das gleichförmige Zeitmaß der mittleren Sonnentage in die Astro-

nomie ein. Mit der Zeitbestimmung selbst blieb es jedoch noch jahrhundertelang schlecht bestellt. Wenn am Tage die Sonnenuhren nicht ausreichten, wurde zuweilen die Höhe der Sonne gemessen und als Zeitangabe vermerkt. So berichtete z. B. der ägyptische Astronom Ibn Iunis, daß zu Kairo am 8. Juni 978 eine Sonnenfinsternis begonnen habe, als die Sonne 56° hoch über dem Horizont stand. Nicolaus Cusanus (1401—1464) gab in seinem inhaltreichen Dialogus de staticis experimentis an, wie man durch Wägung des aus der Klepsydra ausgeflossenen Wassers genaue Zeitmessungen ausführen sollte. Als man nach der Einführung der Räderuhren von den Temporalstunden zu der schon viel gleichmäßigeren wahren Zeit übergegangen war, wurden die Uhrwerke durch fortwährendes Verstellen mit den Angaben der überall vorhandenen Sonnenuhren in Übereinstimmung gehalten. Aber wegen dieser andauernden Eingriffe in den gleichmäßigen Gang der Uhren konnte letzterer selbst überhaupt nicht genau geprüft und reguliert werden, und somit konnte die ganze Zeitmessung nur eine mäßige Zuverlässigkeit erlangen. Noch aus dem Anfange des 19. Jahrhunderts berichtet Delambre, daß man in Paris dieselbe Stunde von den verschiedenen Uhren eine halbe Stunde lang habe schlagen hören.

Übergang zu genauerer Zeitmessung.

Erst als man zu der vollkommen gleichförmig fortschreitenden mittleren Zeit übergegangen war, konnte die Genauigkeit, deren die nun schon ziemlich vollkommenen Uhren fähig waren, wirklich zur Geltung kommen. Im öffentlichen Verkehr wurde die mittlere Zeit zuerst im Jahre 1780 in Genf auf Veranlassung des dortigen Astronomen Favre eingeführt, sodann 1792 in London, 1810 in Berlin, 1816 in Paris.

Öffentliche Einführung der mittleren Zeit.

Die ersten Räderuhren, die um 1300 auftauchen, besaßen zur Regulierung des Ganges den Balancier oder die Wage, einen horizontal schwingenden an beiden Enden beschwerten Stab, der bei jeder Schwingung das schnellste Rad des Uhrwerks, das sogenannte Steigrad, um einen Zahn weiterrücken ließ, wobei ihm das durch das Gewicht oder die Triebfeder des Uhrwerks bewegte Steigrad jedesmal wieder einen Stoß erteilte und ihn dadurch in Schwingung erhielt. Zwar sind die Schwingungen der Wage, solange die Stoßkraft des Uhrwerks unverändert bleibt, ziemlich konstant, aber jede Änderung der Triebkraft oder der Reibung ändert auch ihre Schwingungsdauer, so daß der Gang jener alten Räderuhren nicht sehr gleichmäßig war. Der erste große Fortschritt bestand daher in der Einführung eines Regulators, der für sich selbst ganz unabhängig von der Kraft des Uhrwerks schon eine eigene Schwingungsdauer hat. Es ist interessant, daß die beiden noch heute bei allen unsren Uhren verwendeten Regulatoren zu gleicher Zeit, vielleicht auch von einem und demselben Manne praktisch eingeführt worden sind. Im Jahre 1602 hatte Galilei gefunden, daß gleich große Schwingungen eines Pendels gleich lange Zeit dauern, isochron sind. Zwar benutzte man das Pendel nun vielfach zum Messen kürzerer Zeiträume, indem man seine Schwingungen zählte, aber die allgemeine Anwendung des Pendels anstatt der Wage zur Regulierung des Ganges der Räderuhren datiert erst

Die ersten Räderuhren.

Die Pendeluhren.

seit dem Jahre 1657, als Christian Huygens ein Patent auf diese Erfindung nahm. Allerdings steht es wohl fest, daß auch schon Galilei im Jahre 1641 den Plan zu einer wirklichen Pendeluhr entworfen hat, der jedoch erst zehn Jahre nach seinem Tode praktisch auszuführen versucht wurde, und der 1632 in Kassel gestorbene ausgezeichnete Uhrmacher und Astronom Bürgi scheint schon vor 1612 Uhren mit vertikalem Pendel gebaut zu haben.

Die Taschenuhren.

Für die Taschenuhren, die um das Jahr 1500 von dem Nürnberger Uhrmacher Peter Henlein erfunden worden waren, hatte man zur Regulierung zunächst ebenfalls die Wage angewendet, die zur Begrenzung ihrer Schwingungen gegen zwei Schweinsborsten schlug. Im Jahre 1658, also fast genau gleichzeitig mit Huygens' Patent erfand der Engländer Robert Hooke die noch jetzt bei allen Taschenuhren gebräuchliche Regulierung durch die „Unruhe", ein kleines Schwungrad, welches durch eine elastische Spiralfeder an eine Gleichgewichtslage gebunden ist. Die Schwingungen einer solchen Unruhe sind ebenfalls innerhalb gewisser Grenzen isochron. Doch auch diese Erfindung wurde zunächst nicht allgemein bekannt und erst im Jahre 1675 ebenfalls von Huygens, der sie wohl nochmals selbständig gemacht hatte, veröffentlicht.

Verbesserung der Uhren.

Pendel und Unruhe sind auch heute noch die beiden physikalischen Apparate, die uns zur Herstellung der künstlichen Zeiteinheiten, zur Teilung des Tages in gleich lange kleinere Abschnitte dienen. Es würde hier zu weit von den astronomischen Fragen abführen, wollten wir alle Verbesserungen der Uhren aufzählen, die im Laufe der Jahre eingeführt wurden. Nur die prinzipiell wichtigsten Fortschritte müssen erwähnt werden, da auf ihnen die Sicherheit unserer modernen Zeitmessung zum großen Teil beruht. Alle diese Vervollkommnungen haben immer nur das eine Ziel erstrebt, die oben aufgestellte Grundbedingung für das künstliche Zeitmaß, daß sich alle seine Schwingungen stets unter denselben Umständen vollziehen sollen, mehr und mehr zu erfüllen. Die andauernde Gleichmäßigkeit der Schwingungen der genannten beiden Regulatoren wird nämlich von zwei Seiten her bedroht.

Die freie Hemmung,

Erstens würde jeder solche schwingende Körper, wenn man ihn sich selbst überlassen wollte, durch die unvermeidlichen Reibungswiderstände bald zur Ruhe kommen. Es ist deshalb notwendig, daß die Schwingungen fortwährend durch Anstöße von seiten des Uhrwerks unterhalten werden, wodurch die nie ganz konstante Kraft des letzteren nun doch wieder einen gewissen Einfluß auf die Schwingungsdauer des Regulators erlangt. Man ist daher in erster Linie bestrebt gewesen, die Schwingungen des Pendels und der Unruhe möglichst frei zu gestalten, und zu diesem Zwecke hat derjenige Teil der Uhrwerke, der die Verbindung zwischen Regulator und Räderwerk herstellt, die Hemmung oder das Echappement, zahlreiche Verbesserungen durchgemacht. Für die in den Sternwarten benutzten Präzisionspendeluhren an Pendeluhren, existieren jetzt eine ganze Anzahl sogenannter freier Hemmungen, bei denen das Pendel den größten Teil seiner Schwingung völlig losgelöst vom Einflusse des Räderwerks vollführt und nur während einer ganz kurzen Zeit

mit diesem in Verbindung steht, um das Steigrad um einen Zahn weiterspringen zu lassen und gleichzeitig einen neuen geringen Anstoß zu empfangen. Am weitesten ging hierin wohl Riefler in Nesselwang-München, in dessen freier Hemmung das Pendel selbst überhaupt auch nicht mehr für kurze Zeit eine starre Verbindung mit dem Räderwerk erhält. Die Pendel aller besseren Uhren sind jetzt nicht auf einer Schneide oder, wie es auch vielfach geschah, an einem Faden, sondern an einem dünnen Streifen Stahlblech, der Pendelfeder, aufgehängt, die für gewöhnlich mit ihrem oberen Ende zwischen zwei feststehenden Backen des Uhrgehäuses eingespannt ist und bei den Pendelschwingungen entsprechende geringe Biegungen annimmt. Riefler machte diese obere Befestigung der Pendelfeder selbst beweglich und verband sie mit der Hemmung; bei jeder Schwingung erfährt die Feder durch das Räderwerk eine geringe Spannung und unterhält auf diese Weise die Bewegung des sonst völlig ungestört schwingenden Pendels. Andere Konstruktionen suchen die Gleichmäßigkeit des Pendelantriebs dadurch zu erreichen, daß das Uhrwerk nicht selbst auf das Pendel einwirkt, sondern nur kleine Hilfsgewichte hebt, die bei jeder Pendelschwingung im passenden Zeitpunkt seitlich auf das Pendel aufgelegt werden und durch ihren stets gleichbleibenden Druck die Pendelschwingung unterhalten. Statt durch das Uhrwerk kann man die Hilfsgewichte endlich auch durch Elektromagnete heben, deren Strom durch das Pendel selbst immer zur geeigneten Zeit geschlossen und geöffnet wird. So erhält man den Typus des freischwingenden elektromagnetisch angetriebenen Pendels, dessen Schwingungen durch Zählwerke, die an beliebiger Stelle in den Stromkreis eingeschaltet sind, gezählt und sichtbar gemacht werden können.

an transportablen Uhren.

Noch wesentlich wichtiger als beim Pendel ist die Freiheit der Schwingungen bei den durch eine Unruhe regulierten transportabelen Uhren, da die außerordentlich viel leichtere Unruhe durch wechselnde Einwirkungen des Räderwerks stärker gestört werden würde als ein mehrere Kilogramm schweres Pendel. Die Vervollkommnung der transportabelen Uhren erhielt dauernd die kräftigste Anregung durch die Bedürfnisse der Seefahrt. Im Jahre 1714 schrieb das englische Parlament einen Preis von 20000 Pfund aus für ein Mittel, welches die Längenbestimmung zur See bis auf zwei Zeitminuten genau ermöglichte. Die Hälfte dieses Preises errang durch seine jahrzehntelangen Bemühungen um die Konstruktion zuverlässiger Schiffschronometer der engliche Uhrmacher Harrison. Als Chronometer bezeichnen wir jetzt tragbare Uhren, die mit einer bestimmten, zuerst von Earnshaw eingeführten Gattung der freien Hemmung, der sogenannten Chronometerhemmung, ausgerüstet sind. Außerdem gehört noch der Ankergang zu den freien Hemmungen und wird vielfach in Präzisionstaschenuhren angewendet.

Die Wärmekompensation.

Neben der Befreiung von den Einflüssen des Räderwerkes mußten aber Pendel und Unruhe noch eine zweite Verbesserung erfahren, um zu exakten Zeitmessern zu werden. Zwar ist bei den Pendelschwingungen die

bewegende Kraft, die Schwerkraft, völlig konstant; allein die Länge des Pendels und mit ihr seine Schwingungszeit ändert sich mit der Temperatur. Ferner ist der hydrostatische Auftrieb eines in Luft schwingenden Pendels und die Masse der mit ihm schwingenden Luft von dem Luftdruck abhängig, so daß auch dieser einen recht merklichen Einfluß auf die Schwingungszeit gewinnt. Bei der Unruhe kommt noch dazu, daß die Elastizität der schwingenden Feder mit der Temperatur veränderlich ist. Um den Einfluß der Temperaturänderungen aufzuheben, konstruierte im Jahre 1722 Graham das Quecksilberpendel, 1726 Harrison das Rostpendel — beide noch jetzt in Gebrauch —, und es war eben die Erfindung der thermisch kompensierten Chronometerunruhe, die letzterem den Gewinn des oben erwähnten Preises ermöglichte. Auch die Luftdruckschwankungen werden am Pendel in verschiedener Weise kompensiert.

Die Konstanthaltung von Druck und Temperatur.

Aber alles dieses genügte den in den letzten Jahrzehnten immer höher gestiegenen Ansprüchen der Astronomie nicht mehr. Für gewisse astronomische Untersuchungen ist es von größter Wichtigkeit, daß die Pendeluhr den vierundzwanzigstündigen Tag in absolut gleiche Teile teilt, und daß nicht etwa die Pendelschwingungen während des warmen Tages, wenn auch nur um den winzigsten Bruchteil einer Sekunde anders sind als während der kühleren Nacht. Nun ist es kaum zu erreichen, daß alle Teile der Uhr gleichzeitig den Änderungen der Temperatur folgen, wie es bei der Berechnung der Kompensationen vorausgesetzt werden muß; so wird z. B. das Glasgefäß der Quecksilberpendel seine Temperatur zu langsam ändern, während andererseits die dünne Pendelfeder jede Temperatur sehr rasch annimmt und entsprechend ihre Elastizität ändert. Daher pflegt man jetzt die astronomischen Normaluhren in gleichmäßig temperierten Räumen aufzustellen, in denen namentlich die tägliche Temperaturperiode nicht mehr auftritt. Die neusten Pendel Rieflers bestehen aus einem Stab aus Nickelstahl, welcher einen sehr geringen Ausdehnungskoeffizienten besitzt und daher durch eine verhältnismäßig kleine Messingsäule kompensiert werden kann. Um endlich auch die Schwankungen des Barometerstandes unschädlich zu machen, schließt man diese Präzisionsuhren in einen großen Glaszylinder ein, in dessen Innerem der Luftdruck etwas erniedrigt und konstant gehalten wird. Der Aufzug dieser hermetisch eingeschlossenen Uhren erfolgt automatisch auf elektrischem Wege.

Gangtabelle einer modernen Pendeluhr.

Wie gleichmäßig der Gang einer solchen modernen Präzisionsuhr ist, möge der folgende kleine Auszug aus der Gangtabelle der unter luftdichtem Verschluß und in konstanter Temperatur aufgestellten Rieflerschen Uhr Nr. 56 zeigen, die der Sternwarte Cleveland (Ohio) gehört.

Die „Uhrkorrektion“ ist immer durch astronomische Zeitbestimmungen ermittelt; als Gang bezeichnet man die Änderung der Korrektion in einem Tage, und das positive Vorzeichen gibt an, daß die Uhr zu langsam ging, sie blieb im Mittel an jedem Tage um $0^s,115$ zurück. Aber weder die Korrektion (auch „Stand“ genannt) noch der Gang bilden ein Maß für die Güte

Datum	Uhrzeit	Uhrkorrektion	Änderung der Korrektion	Gang in 24 Stunden	Gangänderung	Abweichung vom mittleren Gange
1901 Dez. 17	$3^h 18^m$	$-13^s,58$				
			$+0^s,40$	$+0^s,103$		$-0^s,012$
21	0 29	$-13,18$			$-0^s,009$	
			$+2,55$	$+0,094$		$-0,021$
1902 Jan. 17	2 20	$-10,63$			$+0,032$	
			$+1,01$	$+0,126$		$+0,011$
25	2 53	$-9,62$			$-0,020$	
			$+0,53$	$+0,106$		$-0,009$
30	3 11	$-9,09$			$+0,029$	
			$+0,68$	$+0,135$		$+0,020$
Febr. 4	4 12	$-8,41$			$0,000$	
			$+0,82$	$+0,135$		$+0,020$
10	6 10	$-7,59$			$+0,002$	
			$+0,70$	$+0,137$		$+0,022$
15	8 52	$-6,89$			$-0,010$	
			$+2,29$	$+0,127$		$+0,012$
März 5	9 20	$-4,60$			$-0,010$	
			$+0,58$	$+0,117$		$+0,002$
10	7 55	$-4,02$			$-0,006$	
			$+1,00$	$+0,111$		$-0,004$
19	8 3	$-3,02$				

der Uhr, diese erkennt man vielmehr nur aus der Konstanz des Ganges. Die letzte Kolumne der Tabelle zeigt nun, daß diese Normaluhr während eines ganzen Vierteljahres höchstens bis zu $0^s,022$ von ihrem mittleren Gange abgewichen ist. Um diese erstaunliche Gleichmäßigkeit des Ganges vollständig zu würdigen, hat man zu beachten, daß das Pendel in einem Tage 86400 Schwingungen macht, deren Dauer demnach bis auf $\frac{0^s,022}{86400} = 0^s,00000025$ oder ein Viermilliontel ihres Betrags konstant geblieben ist. Man wird auch hierin wieder einen Beleg für die schon zu Eingang dieses Kapitels mitgeteilte Tatsache erblicken, daß die moderne astronomische Zeitmessung mit den augenblicklich besten Maßvergleichungen konkurrieren kann.

Die astronomische Zeitbestimmung.

c) Die modernen astronomischen Zeitbestimmungen. Wir haben nun noch in Kürze zu betrachten, auf welche Weise der Astronom die augenblickliche Korrektion seiner Uhr durch Himmelsbeobachtungen ermittelt. Nach der oben aufgestellten Definition der Zeit ergeben sich die wichtigsten Methoden der Zeitbestimmung von selbst. Jede Messung des Stundenwinkels eines Gestirns, dessen Rektaszension bekannt ist, liefert eine Bestimmung der Sternzeit. Am einfachsten ist diese Beobachtung, wenn der Stundenwinkel Null ist, wenn das Gestirn also durch den Meridian geht: dann ist die Sternzeit gleich dessen Rektaszension, und wenn der Mittelpunkt der Sonnenscheibe den Meridian passiert, dann ist der wahre Mittag; aus beiden Beobachtungen kann man nach den früher mitgeteilten Beziehungen die mittlere Zeit der Beobachtung berechnen.

Den Meridiandurchgang der Sonne beobachtete man in früheren Zeiten mit dem Gnomon, der den wahren Mittag bis auf einige Sekunden genau zu liefern vermag, und zu anderen Tageszeiten gaben die Sonnenuhren die wahre Zeit auf einige Minuten an: jedermann machte selbst seine Zeitbestimmung. Durch die Einführung der mittleren Zeit zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurde das gänzlich anders. Nun gaben die Sonnenuhren nicht mehr

die richtige Zeit an, nun gingen mit einem Male die früher so falsch gehenden, immer neu einzustellenden Räderuhren richtiger als die Sonnenuhren. Nun lohnte es auch, die Uhrwerke genauer zu regulieren; und dafür waren wieder genauere Zeitangaben notwendig, als man sie durch die gewöhnlichen Sonnenuhren erhielt. Nur die Sternwarten konnten hinreichend scharfe Zeitangaben liefern, und so vollzog sich mit der Einführung der mittleren Zeit eine erhebliche Verschärfung des allgemeinen Zeitsinns, eine Zentralisation der Zeitbestimmungen: die Sternwarten traten in den öffentlichen Zeitdienst.

Das Durchgangsinstrument im Meridian.

Auf den Sternwarten waren inzwischen längst vortreffliche Hilfsmittel zur genauen Zeitbestimmung ausgebildet worden. Die Grundform des noch heute für die Zeitbestimmung wichtigsten Instruments, des Durchgangs- oder Passageninstrumentes im Meridian, führte um das Jahr 1689 der in Pilenborg nahe bei Kopenhagen beobachtende Astronom Olaus Römer ein. Die Konstruktion desselben wird aus Fig. 2 sofort verständlich sein. AB ist ein recht stabiles, unbiegsames astronomisches Fernrohr von 1 bis 2 m Länge, welches genau senkrecht auf der durch seinen Schwerpunkt gehenden Achse CD befestigt ist. Diese ist um zwei in C und D sichtbare, äußerst sorgfältig gearbeitete zylindrische Stahlzapfen drehbar, die in zwei V-förmigen, an den massiven Steinpfeilern E und F befestigten Lagern ruhen. Stellt man dieses Instrument nun so auf, daß die Achse DC genau horizontal liegt und von Osten nach Westen gerichtet ist, so beschreibt die optische Achse des Fernrohrs die Meridianebene, die im Gesichtsfeld des Fernrohrs durch einen feinen Spinnfaden markiert ist. Denken wir uns das Passageninstrument in allen Teilen vollkommen fehlerfrei, d. h. seine Drehungsachse CD genau senkrecht auf der wirklichen Meridianebene und die Visirlinie AB genau senkrecht auf CD, so hat der beobachtende Astronom nur die Angabe U seiner Sternzeituhr in dem Momente festzustellen, wo ein Stern, dessen Rektaszension α bekannt ist, den Faden im Gesichtsfelde passiert; dann ist direkt $\alpha - U$ die gesuchte Korrektion, der Stand seiner Uhr. Zur Erhöhung der Genauigkeit beschränkt man sich nicht auf die Beobachtung nur eines Sterns, sondern benutzt deren eine größere Zahl, ferner wird der Durchgang nicht nur an einem genau im Meridian aufgespannten Faden beobachtet, sondern an einem System von 10 bis 20 parallelen Fäden, und endlich hat der Astronom bei jeder Zeitbestimmung noch besondere Messungen zur Ermittelung der oben erwähnten Aufstellungsfehler des Instruments auszuführen.

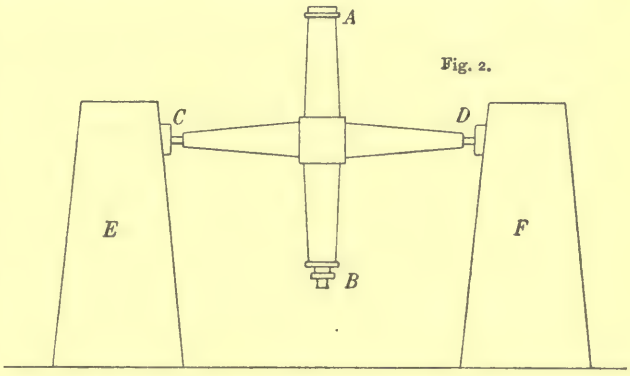


Fig. 2.

Höhenmessung. In Ermangelung eines fest aufgestellten Passageninstruments kann man die Zeit noch auf mancherlei andere Arten bestimmen. Nach dem früher Gesagten wird jede Beobachtung, die zur Ermittelung des Stundenwinkels der Sonne oder eines Sterns dient, auch eine Zeitbestimmung ergeben. So kann man, wie es namentlich auf See stets geschehen muß, die Höhe oder die Zenitdistanz eines Sterns messen und erhält daraus durch eine einfache trigonometrische Rechnung aus dem zwischen dem Zenit, dem Pol und dem Sterne liegenden sphärischen Dreieck den Stundenwinkel des Sterns, also die Zeit. Beobachtet man im Osten und Westen den Durchgang desselben Sterns durch die gleiche Höhe, deren Betrag man gar nicht zu kennen braucht, so liegt mitten zwischen diesen Beobachtungszeiten die Kulminationszeit, wodurch also wieder die Uhrkorrektion ermittelt ist (Verfahren der korrespondierenden Höhen).

Korrespondierende Höhen.

Die Auge-Ohr-Methode. Die zur Zeitbestimmung oder, wie wir nun schon sagen können, zur Ermittelung der Uhrkorrektion auszuführende astronomische Beobachtung besteht somit letzten Endes immer in einer sogenannten Durchgangsbeobachtung, in der Feststellung der Uhrzeit, zu der ein Stern den Faden im Gesichtsfelde des Fernrohres passiert. Diese Beobachtungen werden auf zwei verschiedene Arten ausgeführt. Entweder zählt der Beobachter, während er in das Fernrohr sieht, nach dem Gehör die einzelnen Pendelschläge der Uhr und schätzt, wenn er den Antritt des Sterns an den Faden wahrnimmt, die diesem Zeitpunkt entsprechenden Zehntel der Pendelschläge. Mit dieser „Auge-Ohr"-Methode gelingt es einem geübten Beobachter, die Uhrkorrektion etwa auf eine Zehntelsekunde genau zu ermitteln.

Der elektrische Chronograph. Ein zweites wesentlich genaueres Beobachtungsverfahren besteht in der elektrischen Registrierung der beobachteten Fadenantritte. In dem Augenblicke, wo der Beobachter das Bildchen des Sterns genau von dem Faden halbiert sieht, schließt er mit der Hand einen elektrischen Kontakt und bewirkt dadurch, daß zu gleicher Zeit der Elektromagnet des Chronographen ein Zeichen auf einem bewegten Papierstreifen macht. Der Chronograph, eines der wichtigsten Hilfsinstrumente der Sternwarten, ist ganz ähnlich wie die bekannten Morseschen Telegraphenapparate gebaut. Durch ein möglichst gleichmäßig gehendes Räderwerk wird ein Papierstreifen um etwa 1 bis 2 cm in der Sekunde fortbewegt. Während aber der gewöhnliche Morseschreiber nur einen Elektromagneten besitzt, der die gegebenen Signale auf dem Papierstreifen verzeichnet, enthält der astronomische Chronograph deren zwei, die ihre Zeichen dicht nebeneinander auf dem Papier aufschreiben. Der eine dieser Elektromagnete steht nun mit einer Pendeluhr in Verbindung, die bei jeder Pendelschwingung ein kurzes Signal gibt und so den laufenden Streifen in gleiche Zeitintervalle einteilt. Mit dem andern Elektromagneten gibt der Beobachter die oben erwähnten Durchgangszeichen, und außerdem gibt er vor und nach der Beobachtung des Sterns noch Signale von der zu kontrollierenden Normaluhr aus. Auf diese Weise läßt sich auf einige Hundertstelsekunden genau feststellen, zu welcher Zeit der Nor-

maluhr die Meridianpassage des Sterns stattgefunden hat, und damit ist die Uhrkorrektion bestimmt.

Die persönliche Gleichung.

Bei diesem elektrischen Registrier- oder Auge-Hand-Verfahren ist der Genauigkeit der Zeitbestimmung eine Grenze gesetzt durch die sogenannte persönliche Gleichung, d. h. durch die Reaktionsgeschwindigkeit des Beobachters und ihre Ungleichmäßigkeiten. Beobachtet man nämlich mit dem Auge irgendeine momentane Erscheinung, wie das Aufblitzen eines Lichtsignals oder den raschen Vorübergang des Sternbildchens am Faden, und bemüht sich, zu gleicher Zeit ein Zeichen mit der Hand zu geben, so wird zwischen Beobachtung und Zeichengebung stets ein kurzer Zeitraum, etwa $0^s,1$ bis $0^s,2$ vergehen. Wäre diese „Reaktionszeit" für jeden Beobachter völlig konstant, so würde sie keinen Einfluß auf die Zeitbestimmung selbst haben, da gerade zur Elimination dieses Fehlers die Anordnung stets in der oben beschriebenen Weise getroffen wird, daß nämlich die Signale nicht nur vom Fernrohr, sondern auch von der Normaluhr aus durch denselben Beobachter gegeben werden. Ändert sich jedoch die Reaktionsgeschwindigkeit, so werden dadurch kleine, meistens unter $0^s,1$ liegende Fehler in der Zeitbestimmung entstehen können. Besonders können sich auch die persönlichen Gleichungen mehrerer Beobachter um einzelne Zehntelsekunden unterscheiden, und endlich bleibt auch bei obiger Anordnung stets ein Rest der persönlichen Gleichung in den Zeitbestimmungen erhalten, weil die Reaktionszeit für die verschiedenartigen Beobachtungen am Fernrohr und am Zifferblatt der Normaluhr (Springen des Sekundenzeigers oder gar Abhören der Pendelschläge) etwas verschieden ist.

Das unpersönliche Durchgangsmikrometer.

Um den Einfluß dieser persönlichen Gleichung bei allen Durchgangsbeobachtungen noch weiter herabzudrücken, sind in den letzten Jahren noch zwei neue Beobachtungshilfsmittel eingeführt worden: das unpersönliche Mikrometer und das photographische Durchgangsinstrument. Bei dem zuerst 1886 von Pater J. Braun, dem Direktor der Sternwarte in Kalocsa, vorgeschlagenen, jetzt besonders von der berühmten Hamburger Präzisionswerkstatt von A. Repsold und Söhne ausgeführten unpersönlichen Mikrometer tritt an Stelle der Durchgangsregistrierung das Halten des sich fortbewegenden Sternbildchens auf einem beweglichen Faden. Entweder hat der Beobachter durch dauerndes Drehen an einer Schraube den Faden im Gesichtsfelde fortwährend auf dem Sternbildchen zu halten, oder — bei der vollkommeneren Ausführung des Apparats — dieses Fortbewegen des Fadens wird zum größten Teil von einem Uhrwerk ausgeführt, und der Beobachter hat nur ganz geringe Korrektionen vorzunehmen, um den Faden genau auf der Mitte des Sternbildchens zu halten. Während dieser Fortbewegung des Fadens gibt dann das Mikrometer automatisch die Signale nach dem Chronographen.

Die photographischen Durchgangsinstrumente.

Eine vollständige Unabhängigkeit von den persönlichen Beobachtungsfehlern suchen endlich die photographischen Durchgangsinstrumente zu erreichen, von denen hier der 1891 von Pater Hagen S. J. und Prof. Fargis

S. J. an der Sternwarte des Georgetown-College (Washington) eingeführte Photochronograph und das 1911 an der Göttinger Sternwarte durch Prof. Ambronn konstruierte Durchgangsinstrument erwähnt seien. Bei beiden Apparaten wird direkt hinter das Fadennetz eine photographische Platte gelegt, auf der also der Stern bei seinem Meridiandurchgange eine geradlinige Spur belichtet, die nur an den Stellen der Fäden feine Unterbrechungen zeigt. Um nun die Uhrzeit zu ermitteln, die diesen Unterbrechungen entspricht, hat man nur in der Sternspur einige andere Unterbrechungen zu bekannten Uhrzeiten anzubringen. Indem nun letztere von der Normaluhr selbst auf elektrischem Wege veranlaßt werden, kommt jedes direkte Eingreifen des Beobachters in Fortfall.

Diese photographischen Durchgangsinstrumente sind jedoch vorläufig noch nicht weiter verbreitet und werden nicht zu den regelmäßigen Zeitbestimmungen verwendet, so daß wir im allgemeinen als Grundlage der Zeitbestimmung die vom Astronomen elektrisch registrierte Durchgangsbeobachtung ansehen dürfen. Die Zeitbestimmungen, durch die jedesmal aus mehreren „Zeitsternen" der Stand der Normaluhr auf wenige Hundertstelsekunden genau kontrolliert wird, werden in Zwischenräumen von vier bis zehn Tagen regelmäßig wiederholt. In der Zwischenzeit kann man sich auf die interpolierten Uhrstände stets innerhalb der Zehntelsekunde verlassen. Erst wenn durch ungünstige Witterung wochenlang die Beobachtungen verhindert werden, können weniger gute Normaluhren von der großen Himmelsuhr ganze Sekunden abweichen. Im Jahre 1912 sind jedoch Einrichtungen getroffen worden, die auch bei anhaltend schlechtem Wetter solche Abweichungen unmöglich machen sollen. Hiermit kommen wir zu der letzten Aufgabe des astronomischen Zeitdienstes, der öffentlichen Verteilung der richtigen Zeitangaben.

Die Chronometerprüfungen.

IV. Die Verwaltung der öffentlichen Zeitangaben durch die Astronomie umfaßt zwei verschiedene Aufgaben, nämlich erstens die Prüfung besserer Uhren nach ihrer Fertigstellung in den Fabriken und zweitens die tägliche Abgabe von Zeitsignalen zur fortwährenden Berichtigung aller öffentlichen Uhren. Die Uhrprüfungen, die sich in der Regel nur auf Präzisionstaschenuhren und auf Seechronometer erstrecken, sind an verschiedenen Sternwarten in großem Maßstabe organisiert, so z. B. an der deutschen Seewarte in Hamburg hauptsächlich für Marinechronometer, an der Leipziger Sternwarte für die sächsische und an der Neuenburger und Genfer Sternwarte für die Schweizer Uhrenindustrie. Die von den Fabrikanten eingelieferten Uhren werden einen Monat (Taschenuhren) bis vier Monate lang (Marinechronometer) täglich mit den Normaluhren der Sternwarte verglichen, sie werden verschiedenen hohen und tiefen Temperaturen ausgesetzt, um ihre Wärmekompensation zu prüfen, die Taschenuhren werden auch in verschiedenen Lagen aufbewahrt, um deren Einfluß auf den Gang zu ermitteln. Die Chronometer werden nach dem Ausfall der Prüfung in verschiedene

Klassen geordnet; jede Uhr erhält ein Attest (Gangregister), welches dem späteren Käufer ein sicheres Urteil über die Güte des Werkes ermöglicht. Der jährliche Chronometer-Wettbewerb der deutschen Seewarte ist mit einer Prämienverteilung verbunden. Es sei bemerkt, daß auch schon unter den gewöhnlichen Präzisionstaschenuhren mit Ankerhemmung Werke vorkommen, die innerhalb des Monats ihren täglichen Gang trotz aller Temperatur- und Lageänderungen innerhalb einzelner Sekunden konstant halten.

Die öffentliche Verteilung der richtigen Zeitangaben

Die Einrichtungen zur Abgabe der richtigen Zeit von dem astronomischen Beobachter an das öffentliche Leben haben in dem seit Einführung der mittleren Zeit vergangenen Jahrhundert mancherlei Vervollkommnungen erfahren. Vor der Erfindung des elektrischen Telegraphen wurden in jeder Stadt unabhängige Zeitbestimmungen gemacht, zu allermeist unter Benutzung der überall vorhandenen Sonnenuhren, deren Angaben um die Zeitgleichung verbessert wurden. Auf die dabei unvermeidliche Unsicherheit von mehreren Minuten kam es meistens nicht an. Nur in Städten, die eine Sternwarte besaßen, war man besser daran. Entweder war an der Sternwarte eine öffentlich sichtbare, die richtige mittlere Ortszeit anzeigende Normaluhr angebracht, oder die mit der Wartung der öffentlichen Uhren betrauten Uhrmacher gingen, wie es auch jetzt noch geschieht, etwa wöchentlich einmal zur Sternwarte, um dort die Korrektion einer guten Taschenuhr zu bestimmen, nach der dann die öffentlichen Uhren reguliert wurden. Um auch dem Nichtastronomen etwas genauere Zeitbestimmungen als mittels der Sonnenuhren zu ermöglichen, sind verschiedene einfache Hilfsmittel eingeführt worden, so z. B. Ebles Horoskop, das nach gehöriger Einstellung auf die Sonne die wahre Zeit etwa auf eine halbe Minute genau abzulesen gestattet, ferner Dents Dipleidoskop, Steinheils Passageprisma, Palisas Chronodeik, die einen wohlfeileren Ersatz für das Durchgangsinstrument bilden. Auch die oben erwähnte Beobachtung des Meridiandurchgangs der Sonne an einem großen Gnomon lieferte, sobald die Mittagslinie einmal richtig gezogen war, dauernd gute Zeitbestimmungen. Ein einfaches Verfahren wurde von dem vortrefflichen Bremer Arzt und Astronomen Wilhelm Olbers angegeben, indem er vorschlug, das Verschwinden von Fixsternen hinter senkrechten Mauerkanten von einem festen Standpunkte aus zu beobachten. Solange sich der Ort des Fixsterns am Himmel nicht ändert, findet das Verschwinden immer zu derselben Sternzeit statt, wodurch eine leichte und ziemlich scharfe Kontrolle des Uhrgangs ermöglicht ist.

Benutzung des elektrischen Telegraphen.

Wesentlich verbessert wurde die allgemeine Austeilung richtiger Zeitangaben durch die Einführung der elektromagnetischen Telegraphen. Schon im Jahre 1849, kurz nach der Einführung der staatlichen Telegraphenlinien, wurden diese auch zur Regulierung der Uhren aller Telegraphenämter durch tägliche Abgabe eines Uhrzeichens benutzt. Für Deutschland wird dieses Zeichen jetzt im Sommer um 7 Uhr, im Winter um 8 Uhr morgens vom Haupttelegraphenamt in Berlin abgegeben, dessen Normaluhr durch die Sternwarte kontrolliert wird. Auf diese Weise wird der Stand der Uhren

Das telegraphische Zeitsignal.

aller Telegraphenämter dauernd innerhalb einer Minute richtig gehalten.

Die elektrischen Uhren.

Noch besser kann in den Städten, die eine Sternwarte besitzen, der öffentliche Zeitdienst auf elektrischem Wege geregelt werden, indem man die öffentlichen Uhren durch Leitungen mit einer Normaluhr der Sternwarte verbindet und sie von da aus reguliert. Dabei kommen im allgemeinen drei verschiedene Systeme in Betracht:

1. Die elektrischen Zifferblätter, die lediglich ein Zeigerwerk besitzen, welches von der Zentralstelle aus auf elektromagnetischem Wege in springenden Sekunden oder Minuten bewegt wird; bei diesem System hat jede Störung des elektrischen Betriebes ein vollständiges Versagen aller Zeitangaben zur Folge, so daß eine sehr sorgfältige Anlage und Überwachung notwendig ist.

2. Selbständige Uhren, deren Zeigerstellung nur etwa täglich einmal oder auch in kürzeren Intervallen durch einen elektromagnetischen Eingriff berichtigt wird, während die Uhr in der Zwischenzeit ganz unabhängig weitergeht; nach diesem System arbeitet die Gesellschaft „Normalzeit" in Berlin und anderen Orten.

3. Die sympathetischen Uhren, an sich schon sehr nahe richtig gehende Sekundenpendeluhren, deren einzelne Pendelschwingungen auf elektrischem Wege in völliger Übereinstimmung mit den Schwingungen des Pendels der astronomischen Normaluhr gehalten werden. Dieses vortreffliche System, welches in der ganzen Stadt auf Bruchteile einer Sekunde übereinstimmende Zeitangaben ermöglicht, wurde in den Berliner „Normaluhren" seit 1870 durch Prof. W. Foerster verwirklicht.

Der Zeitball.

Ganz besonderes Interesse an der Abgabe leicht erreichbarer Uhrsignale hat die Schiffahrt, da die Uhr auf hoher See zur Bestimmung der geographischen Länge des Schiffes dient. Daher sind in Hafenstädten und auch sonst an passenden Punkten der Küste Zeitbälle und andere weithin sichtbare Signale angebracht, die zu genau festgesetzten Zeiten ein Zeichen geben, welches ebenfalls meist auf elektrischem Wege von den Sternwarten aus betätigt wird.

Zeitorganisation der Hamburger Sternwarte.

Als ein Beispiel möge hier der vortrefflich organisierte Zeitdienst der Hamburger Sternwarte (jetzt in Bergedorf) erwähnt werden: dieselbe läßt durch elektrisch kontrollierte Uhren die Zeitbälle in Hamburg (Kaispeicher A), in Cuxhaven und in Bremerhaven fallen, gibt auf Kuhwärder und an den St. Pauli-Landungsbrücken viermal täglich elektrische Lichtsignale und nach den deutschen Kabelstationen in Horta (Azoren), Vigo, Monrovia (Liberia), Teneriffa und Pernambuco Zeitsignale; ferner werden in der Stadt Hamburg zwei sympathetische Uhren innerhalb der Sekunde richtig in Gang gehalten, der Gesellchaft „Normalzeit", die ihrerseits wieder viele Uhren reguliert, wird jede zweite Sekunde ein elektrisches Signal gegeben, und endlich ist ein telephonischesZeitsignal eingerichtet, welches es ermöglicht, von jeder mit Hamburg verbundenen Fernsprechstelle aus die Zeitangaben der Hamburger Hauptuhr abzuhören. In jeder Minute ertönt genau von Sekunde 55,0 bis 60,0 mitteleuropäischer Zeit ein langgezogener

Ton, dessen Ende also dem Beginn der neuen Minute entspricht. Die Minutenzahl selbst wird unmittelbar nach Schluß des Signals durch schnarrende Geräusche folgender Form angegeben:

·	= 1m	· —	= 6m
··	= 2	·· —	= 7
···	= 3	··· —	= 8
····	= 4	···· —	= 9
·····	= 5	····· —	= 10
———	= 60m		

Während des übrigen Teils der Minute ertönt zum Zeichen, daß die Verbindung mit dem Zeitsignal hergestellt ist, beständig ein unregelmäßiges Geräusch im Höhrrohr und außerdem bei jeder geraden Sekunde ein kurzer Knack. Bei Benutzung des Signals von außerhalb ist die Verbindung in üblicher Weise anzumelden (Hamburg, Gruppe 4 Nr. 10 000) und nur die gewöhnliche Fernsprechgebühr zu zahlen.

Die Einführung der Einheitszeiten.

Es ist interessant, daß diese große Organisation der Zeitausteilung gerade von Hamburg, der Hauptzentrale des deutschen Seeverkehrs, ausgegangen ist; und auch die beiden neusten nun noch zu besprechenden Fortschritte des öffentlichen Zeitdienstes haben ihre Anregung von seiten des internationalen Verkehrswesens empfangen. Schon bald nach der Einführung der Eisenbahnen machten sich die Unterschiede der Ortszeiten der einzelnen Stationen störend bemerkbar. Das Zugpersonal und jeder Reisende nahm in seiner Taschenuhr die Zeit der Abfahrtsstation mit, und diese wich um so mehr von der Zeit der Ankunftsstation ab, je weiter sich der Zug nach Osten oder Westen bewegte. Bei einer Fahrt von Aachen nach Memel beträgt der Unterschied der Ortszeiten bereits eine volle Stunde. Zur Vermeidung der hieraus erwachsenden Übelstände führten die Bahnverwaltungen bald Einheitszeiten ein, die mit der Ortszeit der Landeshauptstadt oder einer andern nahe der Mitte des Landes gelegenen Stadt übereinstimmend entweder nur, wie z. B. in Deutschland, im innern Dienste verwendet wurden, während die für das Publikum bestimmten Fahrpläne in den Ortszeiten der einzelnen Stationen gedruckt wurden, oder als „Landeszeit“ auch für die Regelung des ganzen übrigen Verkehrs Geltung erlangten, wie z. B. in Frankreich und England. Aber damit waren nur für den Verkehr innerhalb des Landes die Schwierigkeiten beseitigt, bei jeder Überschreitung der Grenze traten nun erst recht große Zeitdifferenzen auf. Vielfach benutzten auch die einzelnen Privatbahngesellschaften besondere Zeiten, wodurch die Verwirrung noch vergrößert wurde; so waren 1879 in der Union und in Canada nicht weniger als 74 verschiedene Bahnzeiten im Gebrauch.

Die Landeszeiten.

Die Zonenzeiten

Zu dieser Zeit schlug der Chefingenieur der Canadischen Pacificbahn Sandford Fleming vor, die ganze Erde durch 24 Meridiane in ebenso viele Kugelzweiecke zu teilen, deren jedes eine feste, von der mittleren Greenwicher Zeit nur um eine ganze Anzahl von Stunden abweichende „Zonenzeit“ haben sollte Am 18. Oktober 1883 beschlossen die Verwaltungen der erwähnten amerika-

nischen Bahnen, auf allen ihren Linien einen Monat später, am 18. November, die Zonenzeit einzuführen, und auch die großen Städte folgten sofort diesem energischen Vorgehen, indem sie auch für das ganze bürgerliche Leben die Zonenzeit anstatt der Ortszeit übernahmen. Nur in England, welches sich wegen seiner geringen ost-westlichen Ausdehnung besonders für die Einheitszeit eignete, hatte man bereits in den vierziger Jahren allgemein die Zeit der Hauptsternwarte in Greenwich als Landeszeit eingeführt. Ebenso hatte Schweden schon am 1. Januar 1879 die um eine Stunde vermehrte Greenwicher Zeit, unsere jetzige „mitteleuropäische Zeit" (M.E. Z.), angenommen. Alle andern Länder folgten langsam nach. In Deutschland wurde die M. E. Z. am 1. April 1893 auch als bürgerliche Zeit allgemein eingeführt. Besonders hartnäckigen Widerstand gegen die Benutzung der englischen Zeit leistete Frankreich. Erst 1911 wurde die „heure légale" beschlossen durch das Gesetz:

> L'heure légale en France et en Algérie est l'heure temps moyen de Paris, retardée de neuf minutes vingt et une secondes.

Da die geographische Längendifferenz Greenwich–Paris $9^m\,20^s{,}94$ beträgt, so stimmt die heure légale praktisch mit der mittleren Greenwicher Zeit (M. Gr. Z.) oder, wie man diese jetzt auch nennt, „westeuropäischen Zeit" (W. E. Z.) überein. Die in den wichtigeren Ländern jetzt benutzten Einheitszeiten sind aus der nebenstehenden Tabelle zu ersehen.

Die Weltzeit.

Die allen Zonenzeiten[1]) zugrunde liegende Greenwicher Zeit wird deshalb auch Weltzeit genannt. War die Einheitszeit auch in erster Linie aus dem dringenden Bedürfnis des Eisenbahn- und Telegraphenverkehrs erwachsen, so brachte sie doch auch für manche Zweige der Wissenschaft Annehmlichkeiten mit sich. So ist jetzt die Übertragung aller in Zonenzeit ausgeführten astronomischen oder geophysikalischen Beobachtungen in Weltzeit außerordentlich erleichtert, und dies kommt immer in Anwendung, wenn Beobachtungen, die an verschiedenen Orten angestellt sind, gemeinsam diskutiert werden sollen. Für andere Fragen rein lokaler Natur, namentlich für alle meteorologischen Erscheinungen, wird dagegen die Ortszeit immer unentbehrlich bleiben.

Die Anwendung der drahtlosen Telegraphie.

Auf der Basis der Weltzeit konnten nun endlich auch die neusten großartigen Organisationen entstehen, die in den letzten Jahren zur Vereinheitlichung und Verschärfung aller Zeitmessungen auf der ganzen Erde geschaffen worden sind. Schon bald nach den ersten Erfolgen der drahtlosen Telegraphie wurde von verschiedenen Seiten der Vorschlag gemacht, dieses neue Hilfsmittel auch zur Übertragung genauer Zeitsignale auf weite Entfernungen zu benutzen. Bereits im Jahre 1904 stellten Prof. Albrecht und Wanach vom Geodätischen Institut in Potsdam Versuche über die Anwendbarkeit der drahtlosen Telegraphie zu exakten Zeitübertragungen an, die so günstig ausfielen, daß im Jahre 1906 dieses Verfahren bereits mit vollem Er-

1) Dieser einmal eingeführte Ausdruck ist eigentlich unrichtig, da die Gebiete gleicher Zeit nicht Kugelzonen, sondern sphärische Zweiecke sind.

Bezeichnung der Zeit	Differenz gegen M. Gr. Z.	Länder
A. Greenwicher Weltzeitsystem.		
Alaska (Yukon) Time	— 9h 0m	Alaska
Pacific Time (P. T.)	— 8 0	Canada, Verein. St (San. Francisco)
Mountain Time (M. T.)	— 7 0	Canada, Verein. St. (Salt Lake City, Denver)
Central Time (C. T.)	— 6 0	Canada, Verein. St. (St. Louis, Chicago)
Eastern Time (E. T.)	— 5 0	Canada (Quebec), Ver. St. (Boston, New York, Washington), Panama, Bahama-Inseln, Peru, Chile
Atlantic Time (A. T.)	— 4 0	Neuschottland, Porto Rico, Martinique, Guadeloupe, frz. Guayana
— —	— 2 0	Azoren, Kapverdische Inseln
— —	— 1 0	Island, Madeira, Port. Guinea
Mittlere Greenwicher Zeit (M. Gr. Z.) od Westeuropäische Zeit (W. E. Z.)	0 0	Schottland, England, Belgien, Frankreich, Spanien, Portugal, Algier, Togo
Mitteleuropäische Zeit (M. E. Z.).	+ 1 0	Norwegen, Schweden, Dänemark, Deutschland, Österreich-Ungarn (Eisenbahnen), Luxemburg, Schweiz, Italien, Bosnien, Serbien, Montenegro, westl. Türkei, Malta, Tunis, Kamerun, Deutsch-Südwestafrika
Osteuropäische Zeit (O. E. Z.). .	+ 2 0	Bulgarien, Rumänien, östl. Türkei, Ägypten, port. Ostafrika, Deutsch-Ostafrika, brit. Südafrika
Indian Time	+ 5 30	Indien, Ceylon
Philippine Time	+ 8 0	Chin. Küste, Borneo, Philippinen, Westaustralien
	+ 9 0	Korea, Japan
Guam Time	+ 9 30	Guam (Marianen), Nord- und Südaustralien
	+10 0	Bismarck-Archipel, deutsch Neuguinea, Queensland, Neusüdwales, Victoria, Tasmania
	+11 30	Neuseeland
B. Landeszeiten.		
Meridian von Mexiko	— 6 36	Mexiko
„ „ Havanna.	— 5 29	Cuba
„ „ Quito	— 5 14	Ecuador
„ „ Bogota	— 4 57	Kolumbien
„ „ Caracas	— 4 28	Venezuela
„ „ Cordoba	— 4 17	Argentinien
„ „ Montevideo . . .	— 3 45	Uruguai
„ „ Rio de Janeiro . .	— 2 53	Brasilien (seit 1913 ebenfalls Stundenzonen)
„ „ Dublin.	— 0 25	Irland
„ „ Amsterdam . . .	+ 0 20	Niederlande
„ „ Athen	+ 1 35	Griechenland
„ „ Pulkowa	+ 2 1	Europ. Rußland (Eisenbahnen)

folg zur Bestimmung des Längenunterschiedes Potsdam-Brocken verwendet werden konnte. Als mittlerer Fehler einer Zeitübertragung ergab sich dabei

mit Leitungsdraht $\pm 0^s,016$
drahtlos $\pm 0^s,018$.

Hiermit war die völlige Gleichwertigkeit der drahtlosen Zeitsignale mit den bisherigen elektromagnetischen Signalen erwiesen, und es lag nahe, dieses neue Hilfsmittel allgemein für die Längenbestimmung der Schiffe auf hoher See nutzbar zu machen, indem man zu feststehenden Zeitpunkten Signale von großen Küstenstationen aussandte.

Die ersten derartigen funkentelegraphischen Zeitsignale wurden von der canadischen Funkstation Camperdown bei Halifax seit 1907 gegeben, die

ihre Zeitbestimmungen vom Observatorium in St. John N. Br. erhält. Es folgten dann die Station Arlington der Verein. Staaten, die deutsche Station Norddeich (1910), die vom K. Marine-Observatorium in Wilhelmshaven die richtige Zeit erhält, und kurz nachher die Eiffelturmsignale nach den Zeitangaben der Pariser Sternwarte.

Da alle diese Signale unabhängig voneinander gegeben wurden, so stellten sich bald Unzuträglichkeiten ein; die Stationen störten sich gegenseitig, sie benutzten verschiedene Wellenlängen, so daß immer erst ein längeres Abstimmen der Empfänger nötig war, und namentlich zeigten sich auch Differenzen zwischen den Zeitangaben verschiedener Herkunft. Letztere konnten namentlich für den Seefahrer verhängnisvoll werden, wenn er bei der Abfahrt aus zwei solchen Signalen den Gang seiner Chronometer bestimmte und, nachdem er aus der Reichweite der Signale gekommen war, seine Uhrstände mit diesem fehlerhaften Gange auf längere Zeit extrapolierte. Um diese Übelstände zu beseitigen und die Zeitsignale einheitlich zu gestalten, wurde nahe gleichzeitig und unabhängig von zwei Seiten — vom französischen Fregattenkapitän C. Tissot und vom früheren Direktor der Berliner Sternwarte Prof. W. Foerster — der Vorschlag gemacht, eine internationale Organisation ins Leben zu rufen.

Die internationale Zeitkonferenz 1912.

Auf Veranlassung des Bureau des Longitudes lud daher die französische Regierung zu einer Konferenz ein, die vom 15. bis 23. Oktober 1912 in Paris zusammentrat und von Vertretern der meisten Kulturstaaten besucht war. Aus den eingehenden Verhandlungen und Beschlüssen sei hier folgendes erwähnt:

Die Signale sollen mit derselben Wellenlänge (2500 m) nach einem einheitlichen Schema und nur zu vollen Stunden Greenwicher Zeit gegeben werden. Es wird gewünscht, daß an jeder Stelle der Erdoberfläche wenigstens ein Nacht- und ein Tagsignal wahrnehmbar sei, im allgemeinen jedoch nicht mehr als etwa vier Signale täglich. Zunächst wurden die folgenden Signale in Aussicht genommen, zwischen denen etwa neu hinzukommende einzuschalten wären:

Paris-Eiffelturm	0^h M. Gr. Z. Mitternacht
San Fernando (Brasilien)	2
Arlington (Ver. St.)	3
Mogadiscio (Ital. Somaliland)	4
Manila	4
Timbuktu	6
Paris	10
Norddeich	12 Mittag
San Fernando	16
Arlington	17
Massaua (Erythräa)	18
San Francisco	20
Norddeich	22

Die Signale haben im allgemeinen eine Genauigkeit von $0^s,25$, was für die Bedürfnisse der Schiffahrt genügt. Um aber für wissenschaftliche Zwecke, z. B. zur genauen Feststellung der Geschwindigkeit von Erdbebenwellen, eine viel weiter gehende Genauigkeit zu erlangen, sollen sich möglichst viele mit erstklassigem Zeitdienst ausgestattete Sternwarten regelmäßig an der Aufnahme der Signale beteiligen. Jede Sternwarte stellt den Unterschied der Signale gegen ihre eigenen Zeitbestimmungen fest, und alle die so erhaltenen Korrektionen der Signale werden an eine Zentralstelle, das zu gründende Bureau International de l'Heure in Paris, eingesandt, von dieser bearbeitet, und die aus dem gesamten Material gewonnenen Korrektionen werden dann den wissenschaftlichen Untersuchungen zugrunde gelegt. Es ist eine großartige Organisation, die durch die gegenseitige Kontrolle zahlreicher Zeitbestimmungen und vortrefflicher Pendeluhren überall die größte Genauigkeit und Übereinstimmung der Zeitangaben mit verhältnismäßig geringer Mühe erreichen lassen wird. Es ist nun kein unerfüllbarer Traum mehr, wenn wir annehmen, daß bald alle wissenschaftlichen Zeitangaben auf der ganzen Erde bis auf eine Zehntelsekunde oder noch weniger in Übereinstimmung sein werden. Das Internationale Zeitamt.

Überblicken wir, auf der Höhe angelangt, noch einmal den Weg, den die Menschheit zurücklegen mußte, um zu dieser Vollendung des Zeitmessungswesens zu gelangen, so sehen wir, wie sich Wissenschaft und Technik die Hand reichten, um einerseits die theoretischen Grundlagen für ein konstantes, gleichförmiges Zeitmaß zu gewinnen und sichere astronomische Beobachtungsmethoden zu entwickeln, andererseits im Bau der astronomischen Beobachtungsinstrumente und der Präzisionsuhren den höchsten Grad der Vollendung zu erreichen. Dabei können wir uns allerdings nicht verhehlen, daß die Fortschritte der öffentlichen Zeitmessung mit einem gewissen persönlichen Opfer des einzelnen erkauft werden mußten. Jahrtausendelang lebte die Menschheit glücklich nach den primitiven Temporalstunden und kannte keine andere Zeiteinteilung als die durch das natürliche Tageslicht selbst gegebene. Auch die wahre Sonnenzeit schloß sich noch genau dem wirklichen Tage an, Mittag war es in der Mitte des Tages. Der Unterschied bis zu einer Viertelstunde, den dann die Einführung der mittleren Zeit zur Folge hatte, ist zwar im häuslichen Leben gerade bemerkbar, bewirkt jedoch noch keine ernstliche Störung. Anders verhielt es sich bei der Übertragung der Zonenzeit in den bürgerlichen Verkehr. Man hat sich damals lebhaft darüber gestritten, ob man die gewaltsame Einführung der unnatürlichen Zeiteinteilung wagen sollte. Allerdings die Bewohner der großen Städte, Geschäftsleute, Beamte, Industriearbeiter, stehen nur noch in sehr losem Zusammenhang mit der Natur und haben ihre Lebensgewohnheiten längst nach ganz anderen Prinzipien geordnet, so daß es ihnen auf eine Verschiebung des Sonnen- auf- und -untergangs um eine halbe Stunde nicht weiter ankommt. Für den Landmann war es dagegen ein empfindlicher Eingriff in altherge- Rückblick.

brachte Sitten, wenn die Mittagszeit um mehr als eine halbe Stunde verschoben wurde, so daß sie den Tag nicht mehr halbiert. Am schlimmsten ist dies, wenn sich die Zeitgleichung noch zur Abweichung der Zonenzeit addiert. So steigt z. B. in Aachen Mitte Februar die Differenz zwischen dem wahren und dem mitteleuropäischen Mittag auf volle 50 Minuten, die Sonne geht $7^h\ 50^m$ M. E. Z. auf und $5^h\ 50^m$ unter, so daß der Nachmittag um volle $1^h\ 40^m$ länger erscheint als der Vormittag. Doch auch hiermit hat man sich abfinden müssen, denn die Vorteile der einheitlichen Zonenzeit waren für jeden, der am allgemeinen Verkehr beteiligt ist, zu groß und einleuchtend. Unser modernes auf die Sekunde geregeltes Verkehrsleben folgt immer mehr dem Motto: „Zeit ist Geld“, und immer seltener werden die Augenblicke, da man sagen darf: „Dem Glücklichen schlägt keine Stunde.“

Literatur.

S. 94 f. Historisches über die Tagesanfänge und Tagesteilungen bei den verschiedenen Völkern findet man ausführlich in F. K. GINZELS Handbuch der mathematischen und technischen Chronologie (Bd. I Leipzig, 1906, II 1911). Grundlegende Untersuchungen über die historischen Tageseinteilungen führte G. BILFINGER aus: Der bürgerliche Tag (Stuttgart, 1888); Die antiken Stundenangaben (Stuttgart, 1888); Die babylonische Doppelstunde (Stuttgart, 1888); Die mittelalterlichen Horen und die modernen Stunden (Stuttgart, 1892). Seinen zuverlässigen Quellenforschungen konnte ich an dieser Stelle meistens folgen.

S. 98. Von der ersten römischen Sonnenuhr berichtet PLINIUS, hist. nat. VII, 60: Princeps Romanis solarium horologium statuisse ante XII annos quam cum Pyrrho bellatum est, ad aedem Quirini, L. Papirius Cursor a Fabio Vestale proditur.

S. 105. Über die allgemeinen Gesetze der Rotation handelt eingehend das 1910 vollendete Werk F. KLEIN und A. SOMMERFELD, Über die Theorie des Kreisels (Leipzig, Teubner). Speziell die Drehung der Erde wurde unter Zugrundelegung des neusten Zahlenmaterials behandelt in L. DE BALL, Lehrbuch der sphärischen Astronomie (Leipzig, Engelmann, 1912). Eine kritische Zusammenstellung der wissenschaftlichen Grundlagen der astronomischen Zeitmessung nebst Literaturnachweisen gibt F. COHN, Reduktion der astronomischen Beobachtungen (Enzykl. der math. Wiss. VI 2, Leipzig, Teubner, 1905).

S. 108. G. H. DARWIN, Ebbe und Flut, deutsch von A. POCKELS (Teubner, 1911), enthält eine gemeinverständliche Darstellung aller Ergebnisse der Gezeitenforschung sowie die Hinweise auf die wissenschaftlichen Originalarbeiten.

S. 118. Beschreibung verschiedener Uhren sowie die sagenhaften Nachrichten über ihre Erfinder gibt VITRUVIUS, de architectura IX. Über das Stoicheion, die antiken Sonnen- und Wasseruhren, sowie über die Stundentafeln findet man Näheres bei BILFINGER, Die Zeitmesser der antiken Völker; Festschrift zur Jubelfeier des Eberhard-Ludwigs-Gymnasiums in Stuttgart 1886. Eine Aufzählung der bis dahin gefundenen antiken Uhren siehe MARQUARDT, Privatleben der Römer (Leipzig, 1886). Die neuere Literatur über die antiken Zeitmesser findet man in dem vortrefflichen Prachtwerk von BASSERMANN-JORDAN, Die Geschichte der Räderuhr (Frankfurt a. M., 1905); zahlreiche Nachrichten und Abbildungen gibt SAUNIER-SPECKHART, Die Geschichte der Zeitmeßkunst (Bautzen, 1903).

S. 119. Eine Rekonstruktion der Uhr des Ctesibus gibt ARAGO, Astronomie populaire II. Die Nachricht von Delambre daselbst VII.

S. 120 f. Über die Geschichte und die Technik der astronomischen Pendeluhren vgl. den Aufsatz von E. GERLAND in Valentiners Handwörterbuch der Astronomie Band IV. Ferner E. GELCICH, Die Uhrmacherkunst und die Behandlung der Präzisionsuhren (Wien, 1892). Über die Geschichte der Räderuhren sowie über die sogenannten Kunstuhren vgl. BASSERMANN-JORDAN und SAUNIER a. a. O.

S. 124. Die Gangtabelle ist entnommen aus Astronom. Journal Nr. 524 unter Ausschluß der Zeitbestimmungen, die weniger als 4 Tage voneinander entfernt waren: die größeren Lücken sind durch schlechtes Wetter verursacht.

S. 125 f. Die astronomischen Instrumente, Chronograph, Durchgangsinstrument, sind eingehend behandelt in L. AMBRONNs Handbuch der Astronomischen Instrumentenkunde (Berlin, Springer, 1899).

S. 132. Eine vollständige Übersicht des neusten Standes der Zonenzeiten gibt das Annuaire pour l'an 1913 publié par le Bureau des Longitudes, Paris.

S. 134. Ein Originalbericht über die Pariser Konferenz findet sich Comptes Rendus 155, 867, sowie ausführlich in den Annales du Bureau des Long. Bd. 9 (1913). Eine zweite Tagung der Internationalen Zeitkonferenz fand im Oktober 1913 in Paris statt.

ASTRONOMISCHE ORTSBESTIMMUNG.

Von

Leopold Ambronn.

Beziehungen zwischen dem Leben auf der Erde und dem Beginn astronomischer Anschauung.

I. Die Anfänge der Orientierung am Himmel und auf der Erde.

Tag und Nacht, Kälte und Wärme oder andere Naturereignisse, die in gewissen regelmäßigen Zeiträumen miteinander abwechseln, hatten die erste Veranlassung gegeben, die Tätigkeit der Menschen zu regeln. Mag das nun geschehen sein mit Rücksicht auf die Arbeit in Familie und Wohnung, oder mag dadurch der Wechsel des Wohnsitzes und der der Weide- und Jagdgründe oder mag später die Bestellung des Feldes danach eingerichtet worden sein. Die Aneinanderreihung solcher regelmäßig wiederkehrender Abschnitte hat dann, wenn auch in den primitivsten Formen, eine Zeitrechnung geschaffen und in Verbindung damit die regelmäßige Feier gewisser Tage, die später den Anstoß gegeben haben zu bestimmten Festsetzungen für solche Gedenktage.

Einmal die Verwaltung der so nach und nach zustande gekommenen Kultusaufgaben, dann aber auch beim Wechsel der Wohnsitze die Notwendigkeit der Bestimmung von Wegerichtungen zu Lande und zu Wasser haben wohl sehr bald erkennen lassen, daß die Beobachtung der Gestirne durch ihr regelmäßiges Erscheinen am Himmel und durch ihre bald erkannte gleichmäßig verbleibende Anordnung die Mittel dazu abgeben konnte.

So mag sich allmählich durch wechselseitiges Bedürfnis die Astronomie in ihren einfachsten Formen entwickelt haben. Der Auf- und Untergang des Tagesgestirnes, des Mondes und der helleren Sterne, die das bloße Auge leicht erkannte, haben in ihren, einen vielfachen Wechsel zeigenden Stellungen zueinander das Gemüt und den Verstand der Menschen sicherlich schon sehr frühzeitig beschäftigt. Es bietet ein großes Interesse, der Entwicklung einer an sich so schwierigen und sich mit so wenig der direkten Verfolgung zugänglichen Dingen beschäftigenden Wissenschaft, die aber trotzdem seit den ältesten Zeiten jedem Menschen mehr oder weniger nahe getreten ist, nachzugehen.

Der Versuch, die wahrgenommenen Veränderungen in der Stellung der Gestirne ganz im allgemeinen miteinander in Beziehung zu bringen und diese wieder den Wahrnehmungen anzupassen, die der Mensch sich auf seinem Wohnplatz, der Erde, verschaffen konnte, hat die Grundlage aller astrono-

mischen Forschungen geliefert. Die Vergleiche, welche man zwischen den Vorgängen am Himmel mit Rücksicht auf die zunächst allein wahrnehmbare Trennungslinie zwischen Himmel und Erde, den Horizont, anstellte, also die Beobachtungen des Auf- und Unterganges der Sonne und der Gestirne, die Erlangung der größten oder geringsten Höhe über den Horizont waren die Anfänge der astronomischen Beobachtungskunst.

Man hat aus den Auf- und Untergängen der Gestirne auf die Drehung des Himmels um die Erde geschlossen, hat aus dem Verlauf dieser Bewegung ersehen, daß diese Drehung um eine Achse vor sich gehen müsse, deren Lage man aus der Bewegung der Gestirne erkannte, und hat den Punkt des Himmels aufgesucht und seinen Ort mit Bezug auf die umgebenden Gestirne bestimmt, welcher bei dieser täglichen, scheinbaren Bewegung ruhend am Himmel zu bleiben scheint. Weiterhin ist wohl bemerkt worden, daß an verschiedenen Stellen der Erde dieser Punkt nicht gleich hoch über dem Horizont stand, daß die Dauer des Verweilens eines und desselben Sternes über dem Horizont, das heißt die Zeit von seinem Aufgang bis zu seinem Untergang, auch für verschiedene Orte nicht die gleiche war, und daß auch in Übereinstimmung mit der Änderung der Höhe des Poles des Himmels die größten und kleinsten Höhen heller Sterne mit dem Ort auf der Erde wechselten. Es mag wohl diese Tatsache zuerst ohne Zuhilfenahme von Instrumenten dadurch wahrgenommen worden sein, daß an gar nicht weit voneinander entfernten Orten ein Stern für den einen Ort noch über dem Horizont erschien, der an dem anderen Ort nicht mehr wahrnehmbar wurde, oder daß an solchen verschiedenen Orten verschiedene Gestirne den Zenitpunkt, das heißt denjenigen Punkt, in welchem die verlängerte Lotlinie das Himmelsgewölbe trifft, erreichten. Es wird erzählt, daß zu Zeiten des Posidonius, also schon Jahrtausende nach dem Beginn der menschlichen Wahrnehmungen am Himmel, eine solche Beobachtung den Anlaß zur Bestimmung der Größe der Erde gegeben habe, die erste Angabe, welche wir darüber besitzen.

Wo wir den Ausgangspunkt der menschlichen Kultur auf der Erde zu suchen haben, wird ein Problem der anthropologischen Wissenschaft bleiben müssen, sicher aber ist wohl, daß in den subtropischen Gebieten des asiatischen Festlandes diejenigen Gegenden vermutet werden dürfen, in denen die Beobachtungen des gestirnten Himmels ihre Wiege haben. Die ältesten wirklichen Aufzeichnungen, die auf uns gekommen sind, stammen aus dem Gebiete zwischen Euphrat und Tigris, aus dem Niltale und aus den alten Kulturländern des fernen Ostens. Man kann wohl annehmen, daß die Anfänge der Himmelsbetrachtung in ihrer einfachsten oben zitierten Form nicht an einem Ort, von einer menschlichen Gemeingruppe ausgegangen sind, sondern daß sich die ersten Feststellungen über die Bewegungen der Gestirne an verschiedenen Stellen der Erde unabhängig voneinander entwickelt haben. Bald nach diesen ersten Anfängen werden die Resultate solcher Betrachtungen, die Verknüpfung derselben mit irdischen Vorgängen, ihre Aneinanderreihung und ihr zeitlicher Verlauf durch die Wanderungen der Völ-

kerschaften und später durch einzelne Personen, die zur Erweiterung ihrer Anschauungen oder aus anderen Gründen ihren Wohnsitz wechselten und ferne Gegenden aufsuchten, von Volk zu Volk übertragen worden sein. Dadurch hat sich dem Interesse an der zeitlichen Folge zwischen den Erscheinungen am Himmel auch bald ein örtliches, von der Beobachtungsstelle auf der Erde abhängiges, angegliedert.

Notwendigkeit der Ortsbestimmung.

Die Grundlage aller Geschichte ist die Zeitrechnung, und diejenige der räumlichen Erkenntnis ist der Begriff der Ortsveränderung; als beide verbindend mag man die Eigenschaft der Materie ansehen, zu verschiedenen Momenten verschiedene Orte des Raumes einzunehmen. Die Bewegungsänderung muß zustande kommen durch eine äußere Einwirkung, durch eine Kraft. Die Beziehungen zwischen Zeit, Ort und Kraftwirkungen hat man zu ergründen versucht. Dieses Bestreben hat den Begriff der Wissenschaft gestaltet, denn Wissenschaft ist eben die Aufsuchung von Gesetzmäßigkeiten im Verlaufe oder in der Anordnung der Ereignisse und der Materie.

Um Veränderungen und Bewegungen festzustellen nach Größe und Dauer, ist es aber vor allem nötig, den Zustand dessen, was verglichen werden soll, für jeden bestimmten Zeitpunkt festzustellen.

II. Die Ortsbestimmung der Gestirne. Die astronomische Wissenschaft hat diese Betrachtungen auf den Anblick des Himmels, auf die Gestalt des Firmaments und auf die Vorgänge an demselben angewendet. Dazu war es also erforderlich, daß man den Ort der Gestirne mit Bezug auf das sichtbare Himmelsgewölbe, welches den Alten in Verbindung mit der sichtbaren Erdoberfläche die Welt schlechthin bedeutete, und mit Bezug auf die verschiedenen Orte der Erde, die der Mensch anfangs zu erreichen vermochte, zu bestimmen suchte. An der Sphäre geschah dies zunächst dadurch, daß man die Gestirne nach ihrer gegenseitigen Stellung zueinander in Gruppen zusammenfaßte, deren Gestaltung und ursprüngliche Bedeutung uns heute kaum noch vollständig zu enträtseln gelingt. Das sind die zum Teil seit den ältesten Zeiten, wenn auch nicht in ganz einheitlicher Form, bekannten und zur Orientierung am Himmel benutzten „Sternbilder".

Auf der Erde hat man Richtungen der Bewegung zunächst nach der Gestaltung der Erdoberfläche angegeben; man ging talauf, talab, nach einem Berggipfel zu und dann nach Sonnenaufgang, nach Sonnenuntergang, nach Mittag zu, d. h. nach derjenigen Richtung, die die Sonne durch ihre Stellung um die Mitte der Zeit zwischen ihrem Auf- und Untergang einnahm, oder nach der gerade entgegengesetzten Richtung, nach Mitternacht. So verband man ohne weiteres die Vorgänge im Laufe der Sonne, d. h. ihre Stellung am Himmel mit den Ortsbezeichnungen auf der Erde.

Durch alle Stufen der geistigen Entwicklung der Völker sind diese Beziehungen bestehen geblieben; immer weiter, immer den Einzelheiten mehr und mehr Rechnung tragend haben sie sich ausgebildet. Dazu war es aber nötig, sichere Bestimmungen der Gestirnorte und ein von Zufälligkeiten der

Beobachtung unabhängiges, allgemein und für jeden Ort auf der Erde gültiges System fundamentaler Punkte, Linien oder Ebenen, also ein Koordinatensystem, zu besitzen.

Die Richtung des herabhängenden Lotes, die Mittagslinie und der Winkel, den die Richtungslinie nach der Sonne zur Zeit ihres höchsten Standes, also bei ihrer Kulmination mit der Lotrichtung einschließt, gaben zunächst die Grundlagen für Koordinatensysteme ab. Bei Nacht wurde die Meridianrichtung durch denjenigen Punkt des Himmels gekennzeichnet, der bei der täglichen Bewegung der Gestirne in Ruhe zu bleiben scheint und in dessen Nähe ein heller Stern, der Polarstern (α Ursae minoris, Cynosura) stand. Die Richtung nach diesem Punkt des Himmels bestimmt zugleich auch die Richtung der Umdrehungsachse der Erde. Die Umdrehungsachse der Erde hat eine im Raume, abgesehen von sehr kleinen Bewegungen, konstante Richtung. Die zu ihr senkrecht stehende Ebene, welche man sich durch den Mittelpunkt der Erde, also auch durch den scheinbaren Mittelpunkt der Himmelsphäre gelegt denkt, ist die Äquatorialebene. Diese Ebene schneidet am Himmel einen größten Kreis ab, welcher den Horizont genau im Osten und im Westen trifft, und in dem die Sonne steht zu einer Zeit, die zwischen den Momenten, in denen sie ihre größte und ihre kleinste Höhe im Meridian erreicht, in der Mitte liegt. Diese Ebene des Äquators bildet ebenso wie die Horizontalebene die Grundlage eines Koordinatensystems. Ein drittes System fundamentaler Richtungen lieferte die Bewegung der Sonne selbst. Es ist nicht schwer gefallen, den Verlauf dieser Bewegung zwischen den Gestirnen festzustellen. Die Verschiebung der Sonnenorte in der Richtung senkrecht zum Äquator wurde zunächst bemerkbar durch den Wechsel der Punkte ihres Auf- und Unterganges und durch die Veränderungen in der Schattenlänge eines senkrechten Stabes um die Zeit des Mittags während der Zeit ihres scheinbaren Umlaufes um die Erde. Ihre Ortsveränderung in der Richtung der täglichen Bewegung, also ihr Fortschreiten zwischen den Gestirnen von West nach Ost, nahm man wahr an dem aufeinanderfolgenden Erscheinen und Verschwinden der hellen Sterne (vgl. S. 65). Der griechische Astronom Eudoxos nahm an, daß die hellsten Sterne wieder sichtbar würden, wenn die Sonne sich um 15 Grad von ihnen entfernt habe. Durch die Beobachtung der nach und nach aus den Sonnenstrahlen wieder auftauchenden Gestirne konnte man dann den Verlauf der Sonnenbewegung in westöstlicher Richtung zwischen den Gestirnen feststellen, ihre Orte mit Bezug auf die Gestirne in die Sternkarten eintragen. Die Vergleichung des längsten und kürzesten Schattens eines senkrechten Stabes (Gnomon) lieferte den Winkel, unter dem diese Sonnenbahn, die Ekliptik, gegen die Äquatorialebene geneigt ist.

Die ersten wirklichen Beobachtungsergebnisse.

Diese Neigung, die sogenannte Schiefe der Ekliptik, die sich als halber Unterschied zwischen der durch den längsten und den kürzesten Schatten bestimmten Höhe ergab, ist zu allen Zeiten mit großem Interesse gemessen worden, sie bildet eines der wichtigsten Bestimmungsstücke für die Bewe-

Lage und Bewegung der Ekliptik.

gung der Himmelskörper im Raume mit Bezug auf die verschiedenen Koordinatensysteme. Einige der bekanntesten historischen Bestimmungen der Schiefe der Ekliptik (ϵ) mögen hier einen Platz finden:

Tschou-Kung in Loyang (um 1100 v. Chr.)	$\epsilon = 23^0\,54'$
Eratosthenes in Alexandrien (um 220 v. Chr.)	$23\ 45\ 7''$
Albategnius in Damaskus (um 879 n. Chr)	$23\ 35\ 41$
Ulug-Begh in Samarkant (1437 n. Chr.)	$23\ 31\ 48$
Bradley in Greenwich (1750 n. Chr.)	$23\ 28\ 18$
Bakhuijzen in Leiden für 1870 n. Chr.	$23\ 27\ 22$

Der jüngst verstorbene amerikanische Astronom Newcomb hat auf Grund dieser und vieler neuen Messungen den allgemeinen Ausdruck:

$$\epsilon = 23^0\,27'\,31'',68 - 46'',837\left(\frac{t-1850}{100}\right) - 0'',0085\left(\frac{t-1850}{100}\right)^2 + 0'',0017\left(\frac{t-1850}{100}\right)^3$$

abgeleitet. Lagrange fand:

für 29400	v. Chr.	$27^0\,31'$
„ 14000	„	$21\ 20$
„ 2000	„	$23\ 53$
„ 6600	n. Chr.	$22\ 54$
„ 19300	„	$25\ 51$ usf.

In sehr langen Perioden schwankt demnach die Schiefe der Ekliptik zwischen den Grenzen $27\frac{1}{2}^0$ und $21\frac{1}{2}^0$.

Von besonderer Bedeutung sind die beiden Punkte, in denen die Sonne auf ihrem Laufe zwischen den Sternen die Äquatorlinie erreicht, da zu diesen Zeiten Tag und Nacht für alle Orte auf der Erde gleich lang werden (abgesehen von der Wirkung der Refraktion). Diese Punkte, die Äquinoktialpunkte, gehören dem System der Ekliptik und dem des Äquators an, sie spielen daher ebenso wie der Winkel, den Ekliptik und Äquatorialebene miteinander einschließen, eine besondere Rolle bei der Umwandlung der Ortsangaben für die Gestirne in beiden Systemen, wie man diese nach den Regeln der sphärischen Trigonometrie auszuführen pflegt.

Präzession, Nutation und Aberration.

Auch die Lage dieser Punkte ist im Laufe der Zeit Veränderungen unterworfen, die ebenso wie die Variation der Schiefe der Ekliptik herrühren von dem nach den Gravitationsgesetzen notwendigen Bestreben der Körper des Sonnensystems, die Lage der Umdrehungsachse unserer Erde stetig zu verändern, wie dies im vorigen Abschnitte bereits auseinandergesetzt wurde. Diese Veränderungen der Koordinatenebenen zueinander nennt man die Präzession. Sie bewirkt, daß die Durchschnittspunkte zwischen Äquatorial- und Ekliptikebene sich im Jahre um $50'',2524 + 0'',000227\,(t - 1850)$ auf der Ekliptik verschieben. Gleichzeitig geht aber auch noch eine kleine Verschiebung dieser Durchschnittspunkte in der Ebene des Äquators vor sich. Beide zusammen bewirken, daß die auf die Lage des Äquators, wie sie für einen bestimmten Moment, z. B. 1850,0 galt, bezogenen Orte der Gestirne sowohl in Rektaszension als auch in Deklination Veränderungen erleiden,

die nach Peters und Struve die Beträge von 46″,0765 + 0″,00028 (t — 1850) und 20″,0564 — 0,000066 (t — 1850) besitzen, wo t immer den Zeitpunkt bedeutet, für den man die Orte der Gestirne kennen lernen will. Diese Verschiebungen werden die einzelnen Sternpositionen gemäß deren Lage zur Äquatorialebene und zum Äquinoktialpunkt beeinflussen. Die Vergleichung der für weit auseinanderliegende Epochen geltenden Gestirnsorte miteinander liefert mit der zunehmenden Genauigkeit dieser Bestimmungen immer sichrere numerische Werte für die in den angeführten Präzessionsausdrücken enthaltenen Konstanten.

Eine Veränderung der Fundamentalebenen gegeneinander wird auch noch durch die Bewegung des Mondes um die Erde und durch die Änderung in der Lage seiner Bahnebene, die in einer Periode von nahezu 19 Jahren vor sich geht, bewirkt. Die dadurch erzeugte scheinbare Ortsveränderung der Gestirne ist die ebenfalls schon im vorhergehenden Abschnitt besprochene Nutation. Sie beträgt nach Peters 9″,2236 und beeinflußt die Orte der Gestirne wiederum verschieden, je nach deren Stellungen zu den Fundamentalebenen.

Als weiterer, bekannter Einfluß auf die für eine bestimmte Zeit gültigen Sternpositionen ist die Aberration wirksam, die bedingt wird durch den Umstand, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des von den Gestirnen zu uns kommenden Lichtes nicht als unendlich groß (sie beträgt 300 000 km in der Sekunde) gegenüber der Bewegungsgeschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn angesehen werden kann. Das Verhältnis beider Bewegungsgrößen zueinander liefert sofort den Maximalbetrag der Aberration. Ihre Einwirkung auf die Orte der Gestirne ist direkt abhängig von dem Winkel, den die jeweilige Bewegungsrichtung der Erde mit der Sehrichtung nach dem betreffenden Stern hin einschließt. Ihr Betrag wird also die Periode eines Jahres haben; ebenso wie die Veränderung, welche durch die Parallaxe in den scheinbaren Gestirnsorten hervorgebracht wird. Diese wird bedingt durch die im Laufe eines Jahres erfolgende Ortsveränderung der Erde gegenüber dem betreffenden Sterne, sie ist also im Maximum gleich dem Winkel, unter dem von dem Gestirne aus die halbe große Achse der Erdbahn erscheint.

Die Bewegung des scheinbaren Himmelsgewölbes um die Erde hat auch zugleich die Mittel an die Hand gegeben, die Richtungs- und Ortsbestimmungen auf der Erde selbst aus den ersten oben geschilderten Anfängen heraus auf allgemeinen Prinzipien aufzubauen. Es wird diese Bezugnahme in ihren ersten Anfängen Hipparch zugeschrieben, indem er den mit der Polhöhe gleichbedeutenden Abstand eines Ortes von der Äquatorialebene als geographische Breite einführte. Durch den Zeitunterschied, welcher zwischen den Kulminationsmomenten der Sonne oder eines hellen Gestirnes an verschiedenen Orten wahrgenommen wird, war ein Maß für die ostwestliche Entfernung zweier Orte unmittelbar gegeben, und diese Verschiedenheit hat auch schon Ptolemäus und vor ihm vielleicht schon andere zur Lagenbestimmung der Erdorte gegeneinander benutzt. Ptolemäus hatte

Geographische reite und ographische Länge.

ganz zweckmäßig als Ausgangspunkt für diese Zählung den Ort, an dem er beobachtete, nämlich Alexandrien, gewählt. Später hat er diesen Anfangspunkt der Längenzählung aber wieder aufgegeben und den viel weniger sicher definierbaren Meridian der Fortunateninseln (die Kanarischen Inseln) als den des westlichsten damals bekannten Landes angenommen.

Diese einfachen Betrachtungen enthalten an sich noch keinerlei spekulatives Moment über den Zusammenhang der dem direkten Anblick sich darbietenden Bewegungsverhältnisse, die den Himmelskörpern zukommen mit Bezug auf die als feststehend angenommene Erde. Allerdings ist schon die Annahme der Kugelgestalt unseres Planeten in die Einteilungsgrundlagen und Ortsangaben mit hineingezogen und sind tatsächlich schon alle Begriffe festgelegt, welche noch heute als Grundlage aller astronomischen Ortsbestimmungen und Forschungen dienen. Drei Koordinatensysteme sind es demnach, in welche wir die Resultate unserer Messungen am Himmel und auf der Erde, soweit sie sich auf Ortsangaben beziehen, einzuordnen pflegen. Das sind:

Die gebräuchlichen Koordinatensysteme.

I. Das System des Horizontes, auf welches heute fast alle fundamentalen astronomischen Ortsbestimmungen bezogen werden,

II. das System des Äquators, dessen Grundebene derjenige größte Kreis ist, welcher auf der scheinbaren Umdrehungsachse des Himmels, also auch auf der Erdachse senkrecht steht,

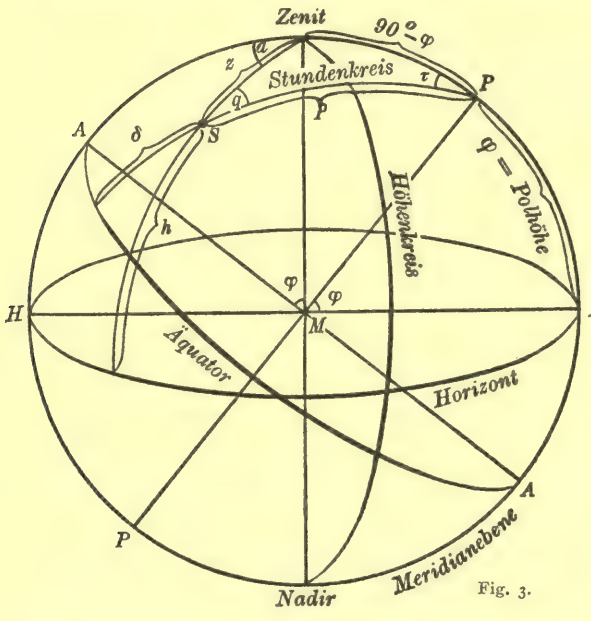


Fig. 3.

III. das System der Ekliptik, welches die Ebene der scheinbaren Sonnenbewegung, also die Ebene, in der sich die Erde um die Sonne bewegt, zur Grundlage hat.

Die gebräuchlichen Bezeichnungen in diesen drei Koordinatensystemen und der Bögen und Winkel, welche ihre Beziehungen untereinander herstellen, sind die folgenden:

System I. Die Pole des Horizontes H (Fig. 3) sind Zenit und Nadir, die durch sie gelegten größten Kreise, die Vertikalkreise, die auf den Horizontalebenen senkrecht stehen, schließen mit dem Meridian die als Azimute (a) bezeichneten Winkel ein. Auf ihnen werden die Abstände der Gestirne vom Zenit (z = Zenitdistanz) oder vom Horizont (h = Höhe) gemessen.

System II. Um den Betrag 90^0 weniger der geographischen Breite (φ) gegen die Horizontalebene geneigt, schneidet diese die Ebene des Äquators

in einer durch den Ost- und Westpunkt gehenden Geraden. Auf der Ebene des Äquators senkrecht stehen die Stundenkreise, die sich im Nord- und Südpol des Himmels schneiden. Von diesen Stundenkreisen ist derjenige der „nullte", welcher durch den Frühlingspunkt geht, d. h. durch denjenigen Punkt, welchen die Durchschnittslinie der Äquatorial- und Ekliptikalebene trifft. Die auf dem Äquator gemessenen Abstände der Stundenkreise von dem nullten Stundenkreis, gezählt in der Richtung der Umdrehung der Erde um ihre Achse, nennt man Rektaszensionen (α). Auf den Stundenkreisen werden die Deklinationen (δ) der Gestirne gemessen als Abstände von der Äquatorialebene. Das Komplement dazu ist die Poldistanz (p). Den Winkel, welchen ein bestimmter Stundenkreis mit dem Meridian einschließt, nennt man seinen Stundenwinkel (τ), entweder gezählt von Süd über West durch Nord und Ost bis 360^0 oder von Süd nach West und Ost als positive und negative Stundenwinkel bis 180^0. Der Winkel zwischen Polarachse und Horizont, die Polhöhe, ist identisch mit der geographischen Breite (φ).

System III. Die Ebene der Ekliptik schneidet die Äquatorialebene in einer Linie, welche diejenigen Stellen beider größten Kreise miteinander verbindet, in denen sich die Sonne befindet, wenn ihre Deklination Null ist. Die Neigung beider Ebenen gegeneinander ist die Schiefe der Ekliptik. Die auf der Ebene der Ekliptik senkrecht stehenden größten Kreise gehen je durch alle Punkte gleicher Länge (λ), welche von dem durch den Frühlingsanfangspunkt hindurchgehenden größten Kreis dieser Art aus gezählt werden. Auf diesen Kreisen mißt man die „Breiten" der Gestirne (β) als Abstände von der Ekliptikalebene.

Das „astronomische" Dreieck.

Das sphärische Dreieck, welches gebildet wird von dem Bogen des Meridians $90 - \varphi$, dem Bogen des Höhenkreises z und dem Bogen des Stundenkreises $90^0 - \delta$ oder p, und dessen Ecken das Zenit, der Himmelspol und ein Gestirn, für welches δ und z gegeben bzw. gemessen sind, enthält außerdem als Winkel $180 - a$ die Ergänzung des Azimuts zu 180^0, den Stundenwinkel τ und am Gestirn den sogenannten parallaktischen Winkel q. Dieses Dreieck ist, wie weiter unten gezeigt wird, von größter Bedeutung für alle Aufgaben der astronomischen Ortsbestimmung.

Das zweite Koordinatensystem, auf die Erde übertragen, liefert die Grundlage für die irdischen Ortsangaben. Das erste System kann mit den beiden anderen nur durch die Hinzufügung einer Zeitangabe in Verbindung gebracht werden, denn während des Verlaufes einer vollen Umdrehung der Erde um ihre Achse nimmt der Horizont eines Ortes alle Lagen gegenüber den Gestirnen ein, die er überhaupt nach Lage des betreffenden Ortes einnehmen kann. Für den Erdpol selbst wird der Horizont stets mit dem Äquator zusammenfallen (abgesehen von der Wirkung der Refraktion), er wird seine Lage gegenüber den Gestirnen stets beibehalten. Für einen Ort am Äquator der Erde wird der Horizont stets mit einem größten Kreis zusammenfallen, der durch beide Pole geht und senkrecht zur Äquatorialebene steht, er wird im Laufe einer Umdrehung der Erde nach

und nach durch alle Punkte des Himmels hindurchgehen, d. h. am Pol werden die überhaupt sichtbaren Sterne stets sichtbar bleiben, also alle weder auf- noch untergehen, am Äquator dagegen werden alle Sterne auf- und untergehen, und sie werden alle gleich lange über und unter dem Horizont verweilen.

Schon die einfachste Beobachtung des gestirnten Himmels ließ im Laufe kurzer Zeit erkennen, daß es unter allen Sternen, die das bloße Auge wahrnimmt, außer Sonne und Mond noch einige Gestirne gibt, die ihren Ort zwischen den scheinbar feststehenden, den Fixsternen, stetig verändern. Von diesen „Wandelsternen oder Planeten" waren schon den alten Babyloniern fünf bekannt, deren Bezeichnungen vielfach gewechselt haben, die aber immer mit den Göttergestalten in Beziehung gebracht wurden; ihre Bewegungen haben zum Teil Veranlassung gegeben, die Gestirne näher zu bezeichnen und später in die oben definierten Koordinatensysteme einzuordnen. Denn nur so war es möglich, den Lauf dieser Wandelsterne gegenüber den festen Gestirnen zu verfolgen.

Die scheinbar festen Gestirne gaben schon von allem Anfang an gewissermaßen das Gerippe für die Ortsangaben, und bevor man noch die Koordinatensysteme einführte, beschrieb man die Stellungen der Wandelsterne oder auch wohl die der wahrgenommenen Kometen nach den Sternen, denen sie nahe kamen. Wann die Gruppierung der Sterne zu den heute gebräuchlichen Sternbildern stattgefunden hat, ist schwer zu sagen, auf alle Fälle war ein Teil derselben schon den Chaldäern und Babyloniern bekannt, wenn auch unter anderen Namen. Nach mehrfachem Wandel, nach Einführung der Zwölferteilung, die wahrscheinlich mit dem Wechsel der Lichtgestalten des Mondes zusammenhängt, bildeten sich die sogenannten Tierkreiskonstellationen heraus. Mythologische Gestalten versetzte man, um ihnen eine Ehre zu erweisen, an den Himmel und verband den Begriff ihrer Gestalt mit bestimmten Gestirnen und mit der gegenseitigen Anordnung derselben. So entstanden nach und nach all die Sternbilder, in die wir heute die Gestirne bei Gelegenheit allgemeiner Beschreibungen des Anblickes des gestirnten Himmels und zum Zwecke ihrer einfachen Benennung noch einzuordnen pflegen. Diese einzelnen Sternbilder sind zu sehr verschiedenen Zeiten eingeführt worden. Einzelne davon sind sehr neuen Datums, und sie sind meist entstanden, um, geradeso wie es früher geschehen war, hervorragende Personen zu ehren oder gewissen bedeutenden Ereignissen oder Erfindungen zum Gedächtnis. Es mag hier nur an die „Karlseiche", die Halley zum Gedächtnis an König Karl II. von England einführte, an das „Brandenburgische Zepter" Gottfried Kirchs, an die „Georgsharfe" (König Georg III.), an das „Spiegelteleskop" des Pater Hell oder an die „Friedrichsehre" des Berliner Astronomen Bode und an dessen „Buchdruckerpresse" erinnert werden. Ein Teil dieser Sternbilder fand Platz an Stellen des Himmels, die die alten historischen Sternbilder nicht ganz ausfüllten, oder sie wurden, was eigentlich viel schlimmer war, aus Teilen alter Sternbilder zusammengesetzt. Es

Entstehung der Sternbilder.

ist dadurch mancherlei Verwirrung in der Abgrenzung der Sternbilder und in der Zuordnung der einzelnen Sterne zu ihnen entstanden. Zum größten Teil sind diese neuen Bezeichnungen wieder außer Gebrauch gekommen, da sie den gegenwärtig gebräuchlichen mehr einheitlichen und wissenschaftlichen Methoden der Ortsangabe nicht mehr entsprechen. Die charakteristischen Figuren, die man in diese Sternbilder einzeichnete, finden sich heute auf älteren Globen und Sternkarten in überreicher Deutlichkeit, so daß ihre Formen die Bezeichnung der Sterne fast völlig verdecken. Um solchen Auswüchsen der zeichnerischen Phantasie vorzubeugen, hat man versucht, und zwar besonders in neuerer Zeit, von der alten Einteilung des gestirnten Himmels in Sternbilder ganz abzusehen oder diesen eine Gestalt zu geben, die mit ihrer alten Bedeutung nur in ganz losem Zusammenhang steht, die früheren Grenzen fast völlig verwischt und sie durch Teile von Stunden- und Parallelkreisen ersetzt. Eine solche Anordnung der kaum noch den Namen Sternbilder verdienenden Flächengebilde ist z. B. in der neuesten Ausgabe des Stielerschen Handatlas von Prof. Rohrbach eingeführt worden, sie dürfte sich aber kaum allgemeiner Billigung bei den Astronomen erfreuen.

Bezeichnung der Gestirne und Sternverzeichnisse.

In dem ältesten auf uns gekommenen Sternverzeichnis, dem des Hipparch, welches Claudius Ptolemäus uns in seinem Almagest übermittelt hat, sind im ganzen 21 Sternbilder nördlich des Tierkreises und 15 südlich desselben und die 12 Sternbilder des Tierkreises selbst aufgeführt. In der Beschreibung dieser Sternbilder sind die Gestirne nach den charakteristischen Teilen der Figur, unter der man sich das Sternbild dachte, beschrieben. Ihre Orte werden nach Länge und Breite angegeben. So heißt es z. B. im I. Sternbild, dem kleinen Bären, welches der mit dem fünften Kapitel des siebenten Buches des Almagest beginnende Katalog aufführt, „der am Ende des Schwanzes“, der 2. Stern ist angeführt als „der nach diesem im Schwanze“ usw. Ähnlich ist die Bezeichnung bei allen Sternbildern getroffen. Auch in den alten Sternbeschreibungen der Chinesen finden sich ähnliche Bezeichnungen.

Daß diese Art der Gestirnsbenennung häufig zu Irrtümern Veranlassung gab, ist leicht verständlich, aber trotzdem wurde dieselbe noch über ein Jahrtausend beibehalten, und erst im 16. Jahrhundert machte Piccolomini den Vorschlag, den Sternen der einzelnen Sternbilder Buchstaben beizulegen und sodann Name des Sternbildes und Buchstaben gleichzeitig zur Bezeichnung des Sternes zu verwenden.

Aber erst zu Anfang des 17. Jahrhunderts führte der Augsburger Rechtsanwalt Johannes Bayer in seiner Uranometria diesen Vorschlag praktisch durch, indem er die Sterne derart mit den griechischen Buchstaben bezeichnete, daß im allgemeinen der hellste Stern eines jeden Sternbildes den Buchstaben α erhielt, der zweithellste mit β bezeichnet wurde usf. Die von Bayer eingeführte Bezeichnung erstreckte sich nur auf die helleren Sterne des Himmels etwa bis zur 3. und 4. Größe herab. Wo die Buchstaben des

griechischen Alphabetes bei einer größeren Anzahl von Sternen in einem Sternbilde nicht ausreichten, wurden lateinische Buchstaben schon von Bayer oder von späteren Astronomen hinzugenommen. Der englische Astronom Flamsteed verwendete in seinem Atlas und Sternverzeichnis, welche 1729 in London erschienen, nicht nur die griechischen und lateinischen Buchstaben, sondern setzte, wie es im Almagest schon geschehen war, den Sternen noch Zahlen bei. So sind in den heutigen Sternverzeichnissen eine Anzahl von Bezeichnungen nebeneinander gebräuchlich, die zur näheren Identifizierung der Gestirne etwa bis zur 6. Größe verwendet werden.

Mit der Erfindung des Fernrohres, dessen Gebrauch sofort die Möglichkeit gab, weit schwächere Gestirne zu erblicken, hörte natürlich die Fortsetzung einer Bezeichnung in dem oben angeführten Sinne von selbst auf. Die Zahl der beobachtbaren Sterne wurde so groß, daß andere Mittel zu ihrer Bezeichnung verwendet werden mußten. Das einzig Mögliche gab dann die Einordnung in ein zölestisches Koordinatensystem ab, und zwar ohne Rücksicht auf die Begrenzung der Sternbilder. Schon in dem Sternverzeichnis des Ptolemäus finden wir neben der oben gegebenen Beschreibung des Gestirnes diejenige nach Länge und Breite. In einer besonderen Rubrik ist die Länge des Gestirnes durch das Zeichen des Tierkreises und durch den Grad in diesem Zeichen angegeben, in einer weiteren Rubrik gibt er den Abstand des Gestirnes von der Ebene der Ekliptik, die Breite in Graden und Minuten. Es ist oben angedeutet worden, in welcher Weise die Alten zu diesen Sternpositionen gelangten, und es muß zu den Angaben des Ptolemäus bemerkt werden, daß sie wohl nur zum kleinen Teil auf eigenen Beobachtungen beruhen, zum größten Teil den Aufzeichnungen des Hipparch, die aber im Original nicht auf uns gelangt sind, entnommen wurden unter Hinzufügung einer Verbesserung von 2 Grad und 40 Minuten, um welchen Betrag sich der Anfangspunkt der Zählung der Längen, der Frühlingsanfangspunkt, gegenüber den Gestirnen in der Zwischenzeit längs der Ekliptik verschoben hatte. Auch in den späteren Sternverzeichnissen, wie sie uns von dem persischen Astronomen Al-Sûfi, der im 10. Jahrhundert zu Bagdad beobachtete, und von dem arabischen Astronomen Ulug-Begh aus dem 15. Jahrhundert und einigen anderen überliefert worden sind, finden wir die Anordnung der Gestirne nach ihren Längen und Breiten, allerdings noch mit der Abgrenzung nach Sternbildern aufgeführt. Der letztgenannte Astronom war wohl der erste, welcher nach Hipparch und Ptolemäus wieder die Positionen der Gestirne selbständig beobachtete und in sein Verzeichnis eintrug. Er selbst sagt in dem Vorwort zu seinen Tafeln: „Wir haben alle Positionen der Sterne, welche schon bekannt waren, neu beobachtet mit Ausnahme von 27 Sternen, die in der Breite von Samarkand nicht sichtbar sind. Das sind 7 im Sternbild des Altars, 8 in dem des Schiffes, 11 im Centaur und 1 im Wolf". Die Positionen dieser 27 Sterne entnahm er aus dem Verzeichnis des Al-Sûfi, indem er die Differenz der Längen für die beiden Epochen anbrachte.

Als der erste Astronom des Mittelalters, welcher tatsächlich selbständige Beobachtungen ausführte, und zwar mit einer bis dahin ungewöhnlichen Genauigkeit, wird gewöhnlich Tycho de Brahe angesehen, der zu Ende des 16. Jahrhunderts auf seiner Sternwarte Uranienburg auf der Insel Hven und später in Prag mit den von ihm selbst konstruierten und gebauten Instrumenten seine Beobachtungen durchführte. In verschiedenen Schriften hat er die Resultate seiner Messungen niedergelegt, und schließlich ist in den von Kepler verfaßten Tabulae Rudolphinae ein Katalog von 1005 Sternen gegeben (geordnet nach Längen und Breiten) für die Epoche von 1601. Eine kleine Liste von 64 Sternen hatte bereits im 15. Jahrhundert der gelehrte Kardinal Nikolaus Cusanus neu beobachtet. Fast gleichzeitig mit Tycho de Brahe erbaute in Kassel der Landgraf Wilhelm von Hessen ein Observatorium, in welchem er selbst in Gemeinschaft mit seinen Gehilfen Christoph Rothmann und Justus Bürgi eifrig beobachtete und als Resultat dieser Beobachtungen einen Sternkatalog zusammenstellte, der 1034 Sterne nach Längen und Breiten geordnet enthält. Tycho de Brahe gibt denselben mit Positionen für 1594 in seiner „Historia Coelestis“. Aus den Originalmanuskripten hat später Lacaille nach der Besitzergreifung Kassels durch die Franzosen aus den dortigen Archiven die Beobachtungen des Landgrafen und Rothmanns Abschriften mit nach Paris gebracht. Sein daraus zusammengestellter Katalog enthält 900 Sterne. Eine größere Anzahl von Sternverzeichnissen ist in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts erschienen, welche zum größten Teil Neureduktionen aus Keplers Tabulae Rudolphinae oder aus den älteren Katalogen enthalten. Davon macht nur der italienische Astronom Riccioli eine Ausnahme, welcher ein Verzeichnis von nahezu 1500 Sternen für die Epoche 1701 gab, welches auf eigenen Beobachtungen, die er und Grimaldi zusammen in Bologna anstellten, beruht. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts beobachtete dann mit ausgezeichnetem Erfolge der Danziger Astronom Hevelius und gab einen Katalog von 1888 Sternen heraus, von denen 950 mit den Verzeichnissen der Araber übereinstimmten, 603 von ihm selbst neu beobachtet waren und in dem er weiterhin 335 aus dem kurz vorher bekannt gewordenen Verzeichnisse des englischen Astronomen Halley, welcher um jene Zeit auf der südlichen Halbkugel beobachtet hatte, entnahm. Um jene Zeit begann man auch neben den Längen und Breiten die Rektaszension und Deklination in den Verzeichnissen anzugeben, weil die Resultate der Beobachtungen, die als Höhen und als Azimute erhalten wurden, leichter in Rektaszension und Deklination mit Hilfe der geographischen Breite verwandelt werden können, ohne Zwischenschaltung der Schiefe der Ekliptik, die ja eigentlich mit den Orten der Gestirne direkt auch nichts zu tun hat. Alle bisher genannten Beobachter mit Ausnahme Halleys hatten ausschließlich auf der nördlichen Halbkugel beobachtet. Die Folge war, daß die Sterne der südlichsten Konstellationen nur mangelhaft ihrem Orte nach bekannt sein konnten, ja zum Teil nur auf sehr wenig genauen Beschreibungen ein-

Tycho de Brahe.

Landgraf Wilhelm von Hessen.

Halley, Flamsteed, Bradley, Tob. Meyer.

zelner Reisender in die Verzeichnisse eingetragen waren. Den ersten auf besseren Beobachtungen auf der südlichen Halbkugel beruhenden Katalog gab ein gewisser Jakob Bartsch heraus, dessen 136 Positionen auf den Reduktionen Peter Theodors, eines Seemanns, beruhten. Es war daher von großer Wichtigkeit, daß Edmund Halley im Jahre 1676, er war kaum 20 Jahre alt, sich nach der Insel St. Helena begab, um dort durch eigene Beobachtungen die bisherigen Sternverzeichnisse für die südliche Halbkugel zu ergänzen. Sein Katalog, den er 1679 kurz nach seiner Rückkehr herausgab, enthält die Orte von 341 südlichen Sternen. Eine Neureduktion dieses Katalogs hat später der englische Astronom Baily vorgenommen und in den Mem. Roy. Ast. Soc. vol. XIII veröffentlicht. Die zuletzt genannten Sternverzeichnisse bilden die Grundlagen der gegenwärtigen Forschungen über den Bau des Weltsystems. Erst sie sind mit der nötigen wissenschaftlichen Genauigkeit und Kritik der Beobachtungsdaten sowie mit Instrumenten angestellt, die heutigen Anforderungen einigermaßen entsprechen. Auch waren erst um jene Zeit, allerdings im wesentlichen auf den Vergleichen mit den älteren Verzeichnissen beruhend, die nötigen Reduktionsdaten mit einigermaßen genügender Sicherheit bekannt geworden, um zu verschiedenen Zeiten angestellte Beobachtungen miteinander zu vergleichen und ihre Resultate auf ein und denselben Zeitpunkt (Epoche) mit Hilfe der Präzession zu reduzieren. Von wesentlich größerem Umfang als die bisherigen Sternverzeichnisse, selbst die des Hevelius und des Landgrafen von Hessen an Reichhaltigkeit und Genauigkeit übertreffend, ist der Katalog, welchen der Vorgänger Halleys in der Direktion der Kgl. Sternwarte zu Greenwich, Flamsteed, im Jahre 1725 mit 2934 Sternen bis zur 7. Größe herab im zweiten Bande seiner Hist. Cölst. Britan. veröffentlichte. Die großen Instrumente, die zum Teil nach eigenen Angaben Flamsteeds gebaut waren, gewährten eine große Genauigkeit der Beobachtungen. Seine Angaben in Verbindung mit denen des Hevelius sind nachmals mehrfach neu reduziert und mit dem Himmel verglichen worden, dahin gehören die Kataloge der Karoline Herschel, einer Schwester des berühmten Wilhelm Herschel, welche 1798 eine neue Zusammenstellung von 561 der Flamsteedschen Sterne herausgab, und die Bailysche Bearbeitung, die 564 Sterne aufzählt. Von ganz besonderer Bedeutung wurden zwei weitere Kataloge, deren Epochen allerdings schon um etwa 50 Jahre später liegen, das sind diejenigen, welche der Abbé de Lacaille bei seinem Aufenthalte am Kap der guten Hoffnung zusammenstellte, und in noch hervorragenderem Maße der auf den Beobachtungen des englischen Astronomen Bradley beruhende, eines Nachfolgers von Flamsteed und Halley in der Direktion der Greenwicher Sternwarte. Hat der erstere für die Beschreibungen und Ortsbestimmungen der Gestirne der südlichen Halbkugel die Grundlage geschaffen, sein Katalog enthält 9766 Sterne, reduziert auf die Epoche 1750, so gibt der letztere in seinen mehrfachen Neubearbeitungen die fundamentalen Sternorte für die gesamten neueren Forschungen im Gebiete der Stellarastronomie. Einen sehr vollständigen Kata-

log hat am Schlusse des 18. Jahrhunderts der französische Astronom Lalande gegeben, der 47 390 Sternorte (Sterne bis zur 10. Größe) enthält. Die Positionen beruhen auf Beobachtungen zu Paris, die Berechnungen sind auf Kosten der „British Association" ausgeführt und 1847 publiziert worden. In den letzten Dezennien wurden diese Lalandeschen Sterne in Paris neu beobachtet. — Die Neubearbeitung dieses Kataloges, die Bessel in seinen „Fundamenta Astronomiae" gibt, enthält 3268 Sterne. Sie ist begründet auf einer vollständig neuen Diskussion der Beobachtungs- und Instrumentalfehler, welche den Greenwicher Beobachtungen Bradleys und seiner Gehilfen anhaften. In weitaus gründlicherer Weise und mit den Hilfsmitteln der neuesten Zeit, im besonderen durch Vergleich mit den fast gleichzeitigen Beobachtungen des Göttinger Astronomen Tobias Mayer hat Arthur Auwers, der Astronom der Kgl. Akademie der Wissenschaften in Berlin, eine Reduktion der Bradleyschen Beobachtungen vorgenommen. Abgesehen davon, daß die so gewonnenen Orte der Bradleyschen Sterne mit allen neuen Beobachtungen dieser Sterne verglichen wurden, ist auch in den letzten Jahren des vorigen Jahrhunderts eine vollständige Neubestimmung aller Bradleyschen Sterne an dem großen Meridiankreis der Berliner Sternwarte von Prof. Küstner vorgenommen worden.

Herstellung fundamentaler Sternverzeichnisse durch Auwers und Newcomb.

Bevor hier weiter auf die Resultate dieser fundamentalen Arbeiten, die in Verbindung mit den an sehr vielen Observatorien im Laufe der letzten 200 Jahre gewonnenen Resultaten zu einer vollständigen „Geschichte des Fixsternhimmels" unter der Leitung von A. Auwers durch die Kgl. Akademie der Wissenschaften in Berlin zusammengefaßt werden, eingegangen wird, möchte ich noch auf eine Anzahl von Sternverzeichnissen hinweisen, die entweder entstanden sind, um eine vollständige Zusammenstellung der mit einem nicht sehr großen Fernrohre überhaupt sichtbaren Gestirne zu geben, oder die die spezielle Erforschung einzelner Gegenden des Himmels oder bestimmter Zonen (Zonenbeobachtungen) sich zur Aufgabe stellen. Dahin gehören vor allem die ausgedehnten Beobachtungsreihen, deren Resultate z. B. Bessel in Königsberg in den Grenzen zwischen den beiden Wendekreisen oder in der sich daran anschließenden Zone bis 45 Grad nördlicher Breite ausführte, und die später M. Weiße sorgfältig auf das Jahr 1825 reduzierte. Der erstere Katalog umfaßt 31 085 Sterne und der zweite 31 445 bis zur 9. Größe herab. Kartierungen der Gestirne umfangreichster Art sind ausgeführt worden von Harding im „Neuen Himmelsatlas von 27 Tafeln, enthaltend die bis jetzt zwischen dem Nordpol und dem 30. Grade südlicher Abweichung beobachteten Sterne, Halle 1856", etwa 60 000 Sterne. Weiterhin im Auftrage der Berliner Akademie die sogenannten akademischen Sternkarten, denen außer der Darstellung auf 24 Kartenblättern, je eine Stunde umfassend, auch Verzeichnisse beigegeben sind, die im ganzen 40059 Sterne enthalten. Die einzelnen Stundenblätter sind von verschiedenen Astronomen bearbeitet.

Ganz besonders gehört aber zu dieser Klasse der Sternverzeichnisse

das von Argelander und später von seinen Gehilfen Schönfeld und Krüger aus eigenen Beobachtungen zusammengestellte Bonner Sternverzeichnis, die sogenannte „Bonner Durchmusterung", welches zunächst in drei Bänden erschien, von denen der erste die Sterne von — 2 Grad bis + 20 Grad, der zweite die von + 20 bis + 41 und der dritte diejenigen von 41 Grad bis zum Pol enthält. Die in den Verzeichnissen enthaltenen Sterne bis zur 9,5. Größe sind auch in einem großen Atlas eingetragen. Verzeichnisse und Atlas enthalten 110984 + 105075 + 108129, also im ganzen 324188 Objekte, darunter eine Anzahl von Sternhaufen und Nebelflecken, die in dem für die Beobachtungen benutzten Kometensucher von 6 Zoll Öffnung noch gut sichtbar waren. Die Orte der Gestirne sind in diesem Verzeichnis nicht mit der äußersten erreichbaren Genauigkeit angegeben, was auch dem Zweck des Verzeichnisses, nämlich eine allgemeine Übersicht der mit mäßigen optischen Mitteln sichtbaren Sterne zu geben, vollkommen entsprach. Dieses Verzeichnis wurde später von Schönfeld allein fortgesetzt, und der von ihm herausgegebene Band umfaßt die Zonen zwischen 2 Grad und 23 Grad südlicher Deklination. Er enthält ebenfalls alle Sterne, welche mit dem gleichen Instrument in Bonn sichtbar sind, und die untere Grenze der Helligkeit ist sogar noch etwas weiter herabgesetzt, so daß das Verzeichnis die sogenannte „Südliche Durchmusterung", im ganzen die genäherten Orte von 133659 Sternen enthält. Ähnlich wie für die auf der nördlichen Halbkugel sichtbaren Gestirne die Bonner Durchmusterung und Südliche Durchmusterung das vollständige Verzeichnis aller Gestirne bis zur 9,5. Größe enthalten, so besitzen wir auch für die südliche Halbkugel ein ähnliches Werk von Gould, die sogenannte Cordoba-Durchmusterung, welche die Gestirne zwischen 22 Grad und 41 Grad südlicher Deklination bis zur 10. Größe herab im ganzen 340215 enthält. Diese Durchmusterung ist später nach Süden fortgesetzt worden, und ein erheblicher Teil der Beobachtungen, allerdings mit genaueren Orten, ist in dem Cordoba-Generalkatalog enthalten. Alle diese Durchmusterungen, also Verzeichnisse, welche uns genäherte Orte der Gestirne geben, enthalten zusammen etwa 700000 Sterne. Durch das Zusammenwirken der genannten Astronomen sind wir also zu einem deutlichen Bilde des gestirnten Himmels gelangt, soweit es sich um Gestirne bis zur 9. oder 10. Größenklasse handelt.

Besonders waren es die Entdeckungen der kleinen Planeten, welche mit Anfang des vorigen Jahrhunderts begannen und sich nach und nach auf immer lichtschwächere Objekte ausdehnten. Hatte man im letzten Drittel des vorigen Jahrhunderts durch visuelle Beobachtungen etwa noch kleine Planeten entdeckt, welche zur Zeit ihrer Erdnähe eine Helligkeit zeigten, die etwa der 11. oder 12. Größenklasse entsprach, so war es auch für deren gesichertes Auffinden schon notwendig geworden, für bestimmte Gegenden des Himmels Sternverzeichnisse und namentlich Sternkarten anzufertigen, welche wesentlich schwächere Sterne verzeichneten als die vorgenannten Durchmusterungen und die auf ihnen beruhenden Kartenwerke. Besonders

sind solche Karten angefertigt worden durch Peters in Clinton und Palisa in Wien. Mit Anwendung der Photographie auf die cölestischen Beobachtungen ist es aber bald gelungen, auch Planetoiden von noch geringerer Helligkeit zu entdecken, und zwar in viel schnellerer Folge, als es früher der Fall war. Da ergab sich nun ganz von selbst die Notwendigkeit, die Photographie auch dazu zu verwenden, diejenigen Gegenden des Himmels zu kartieren, in denen diese kleinen Himmelskörper vorzugsweise sich bewegen. Aus diesem Bedürfnisse heraus gelangte man bald dazu, die photographischen Aufnahmen des Sternenhimmels in systematischer Weise auf den ganzen Himmel auszudehnen. So entstand eine große Vereinigung von Sternwarten, verteilt über die ganze Erde, welche, ausgerüstet mit gleichen Instrumenten, sich verpflichteten, bestimmte Zonen des Himmels photographisch aufzunehmen und so ein Bild des Himmels zu schaffen, welches direkt ohne Zwischenschaltung menschlicher Beobachtungstätigkeit eine genaue Darstellung der Gestirne nach Ort und Helligkeit liefert, wie sie die ersten Dezennien unseres Jahrhunderts sich gestaltet. Diese photographische Himmelskarte umfaßt nach den Festsetzungen der Pariser Konferenz vom Jahre 1896 alle Gestirne bis zur 13. Größenklasse. Die gewonnenen photographischen Aufnahmen werden aber auch dazu benutzt, durch genaue Messungen die Positionen der Gestirne im Verzeichnisse zusammenzufassen. Diese Arbeit ist gegenwärtig noch in vollem Gange, und es ist daher unmöglich, eine Schätzung über die Anzahl der auf den gewonnenen Platten und in dem herzustellenden Verzeichnis befindlichen Sterne zu geben; voraussichtlich werden es ihrer 8—10 Millionen sein.

Anwendung der Photographie auf die Kartierung des Himmels.

Neben diesen Arbeiten, die der allgemeinen Übersicht über den Bau des Universums dereinst zur Grundlage dienen werden, laufen einher noch eine große Anzahl spezieller Unternehmungen, die ebenfalls der Bestimmung der Orte der Gestirne in besonderer Weise dienten. Einmal sind das Arbeiten, welche sich zum Ziel setzten, Ortsbestimmungen der Gestirne zu liefern mit der größten Genauigkeit, welche die gegenwärtig im Gebrauch befindlichen Meridianinstrumente zu liefern in der Lage sind, andererseits aber gehören dahin Unternehmungen, welche die Erforschung bestimmter Sternklassen verfolgen. Z. B. sind das Verzeichnisse der Gestirne, welche eine dichte Sterngruppe, einen Sternhaufen, umfassen, um deren Innenbau genauer kennen zu lernen oder möglicherweise Veränderungen in der örtlichen Konfiguration der Gestirne mit der Zeit nachzuweisen. Solche Verzeichnisse besitzen wir von dem Plejaden, von dem Sternhaufen im Perseus, von dem Sternhaufen im Krebs (die sogenannte Krippe) und vielen anderen. Ein ausgedehntes Gebiet der Forschung bilden ferner die Doppelsterne und mehrfachen Sterne. Schon Herschel stellte einen Katalog solcher Gestirne zusammen. Bei weitem die umfangreichsten Beobachtungsreihen solcher sich tatsächlich nahestehenden oder nur nahe beieinander erscheinenden Sterne haben W. Struve in Dorpat und Pulkowa und Otto Struve am letzteren Orte ausgeführt. Eine große Anzahl Astronomen hat sich später mit der Doppel-

Ortsbestimmung in einzelnen Sterngruppen.

sternforschung befaßt, und es ist gelungen, nachzuweisen, daß unter den vielen Objekten dieser Art sich tatsächlich eine große Anzahl von Gestirngruppen befindet, die im physischen Zusammenhang miteinander stehen und für welche man die Bahnen, in denen sie umeinander kreisen, mit Sicherheit bestimmen konnte mit Zugrundelegung der in unserem Sonnensystem gültigen Gravitationsgesetze. Es ist das ein Nachweis von großer kosmischer Bedeutung. Allerdings stehen in solchem Zusammenhang fast nur die auch dem Auge dicht beieinander erscheinenden Gestirne, und gerade dieser Umstand hat veranlaßt, daß man die mächtigsten optischen Instrumente, welche wir besitzen, der Aufsuchung und Messung der Doppelsterne gewidmet hat. So ist es u. a. dem amerikanischen Astronomen Burnham gelungen, in den letzten Dezennien eine große Anzahl äußerst enger Doppelsterne aufzufinden, für welche die Distanz der beiden Komponenten geringer als eine Bogensekunde ist, ein Teil derselben ist bereits mehrfach beobachtet, und es scheinen viele dieser Sternpaare in physischer Beziehung zueinander zu stehen. Es ist interessant, hier zu erwähnen, daß schon Herschel durch eine Betrachtung der allgemeinen Verteilung der Gestirne am Himmel zu der Auffassung gelangt war, daß unter den so nahe beieinander stehenden Gestirnen unbedingt solche sein müßten, die nicht bloß durch die zufällige allgemeine Verteilung der Gestirne im Raume nahe beieinander erscheinen könnten, sondern daß eine so große Anzahl von Doppelsternen nur ihre Erklärung darin finden könne, daß eine größere Anzahl derselben für sich gemeinsame Systeme bildeten. Außer den Verzeichnissen der Doppelsterne hat man solche zusammengestellt für die Nebelflecke, für Gestirne, welche eine bestimmt ausgesprochene, besonders rote Farbe zeigen, für Sterne von veränderlicher Helligkeit und andere interessante Objekte. Für die Nebel sind ebenfalls die Kataloge von W. Herschel und John Herschel und der zusammenfassende Katalog von Dreyer, welcher alle bis in die 80er Jahre bekannt gewordenen Nebelflecke umfaßt, von Bedeutung. Für die roten Sterne hat Friedr. J. Krüger einen Katalog zusammengestellt. Diese Gestirne sind von besonderer Bedeutung geworden, da sie fast alle dem Typus der veränderlichen Gestirne zugehören. Auch über letztere Klasse der Gestirne hat man eifrig Beobachtungen gesammelt, und ein zusammenfassender Katalog derselben wird gegenwärtig im Auftrage der Astronomischen Gesellschaft von den Astronomen G. Müller und E. Hartwig herausgegeben. Neben allen diesen mehr oder weniger zusammenfassenden Arbeiten sind aber eine große Anzahl von Verzeichnissen bearbeitet worden, welche einen monographischen Charakter tragen. Sie erstrecken sich entweder nur auf ein bestimmtes Gebiet des Himmels, z. B. die Polargegenden, oder auf eine Gruppe von Gestirnen, wie es schon diejenigen tun, welche die Sternhaufen behandeln. Wenn oben die allgemeinen Sternverzeichnisse und das auf Grund der photographischen Aufnahmen resultierende Verzeichnis der Gestirne erwähnt wurden für solche Zusammenstellungen, welche im wesentlichen allgemeinen Untersuchungen kosmischer Natur dienen sollen, so muß nunmehr noch auf

Doppelsterne, farbige Sterne.

diejenigen Arbeiten eingegangen werden, welche sich mit der genauen Ortsbestimmung der Gestirne befassen. Das sind, abgesehen von solchen, welche kleinere Gebiete des Himmels behandeln, vor allem das große Unternehmen der Astronomischen Gesellschaft, welches bezweckt, die genauen Orte aller Gestirne der Bonner Durchmusterung und der Südlichen Durchmusterung herab bis zur 9,5. Größe zu bestimmen und in Kataloge einzutragen. Diese Arbeit, an welcher sich wiederum eine große Anzahl von Sternwarten beteiligte und die in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts auf Anregung Argelanders begonnen wurde, ist gegenwärtig für die nördliche Halbkugel beendet, von dem Gebiete bis zum Wendekreise des Steinbocks fehlen nur noch einige Zonen.

Die Vergleichung des so gewonnenen Bildes des Himmels mit den älteren Verzeichnissen und besonders mit den Beobachtungsresultaten von Bradley hat schließlich den Wunsch gezeitigt, alle genaueren Beobachtungen von Sternpositionen zusammenzutragen und aus den Veränderungen, die im Laufe der Jahrhunderte die Konstellationen des Sternhimmels erfahren haben, Schlüsse zu ziehen auf die im Weltenraume wirksamen Kräfte. Aus diesem Wunsche heraus ist gegenwärtig ein Unternehmen im Gange, welches sein Begründer A. Auwers unter dem Namen „Geschichte des Fixsternhimmels" zusammenzufassen gedenkt. Dieses weitumfassende Werk wird über eine Million einzelner Beobachtungsresultate in sich zur gemeinsamen Diskussion vereinigen. Mit seiner Hilfe wird es dereinst möglich sein, die Ortsveränderungen der einzelnen Gestirne im Laufe der Zeit zu ermitteln, soweit sie einmal abhängig sind von der Bewegung unseres Sonnensystems im Raume und andererseits bedingt sind durch die eigenen Bewegungen, welchen die Fixsterne für sich unterworfen sind. Dadurch wird es gelingen, die Gestalt der Bahn unseres Sonnensystems nach Jahrtausenden festzustellen und die Kräfte kennen zu lernen, welche die Bewegungen im gesamten Weltensystem bedingen. Diese Geschichte des Fixsternhimmels wird einstmals eine Grundlage der gesamten Himmelsforschung abgeben, aber in unendlich viel weiterem Umfange, als sie vor 2000 Jahren Ptolomäus durch seinen Almagest geliefert hat.

„Geschichte des Fixsternhimmels".

III. Die Ortsbestimmung auf der Erde. Die ersten Anfänge der astronomischen Ortsbestimmung haben sicherlich ihren Ausgang genommen von dem Bedürfnisse der Orientierung bei Reisen zu Lande und besonders auf dem Meere, wo im Gegensatz zum ersten Falle die Möglichkeit der Richtungsbestimmung nach festen, bekannten Objekten fortfällt, sobald man aus Sicht der Küste gelangt. Wenn auch bis in die Zeiten der Phönizier wohl ausschließlich Küstenfahrten gemacht wurden, um mit fremden Völkern in Handelsbeziehungen zu treten, so wissen wir doch, daß schon, bevor Marco Polo und Magelhanes ihre Reisen um das Kap der guten Hoffnung und die vollständige Umsegelung der Erde ausführten, manche weiten Reisen unternommen worden sind, so diejenigen Cäsars nach Britannien, die der

Geographische Ortsbestimmung.

Normannen nach Süden und Westen. Da erst viel später die Kenntnis von den Eigenschaften der Magnetnadel entweder aus dem fernen Osten zu uns gelangte oder vielleicht auch in den Ländern des Mittelmeeres unabhängig davon gefunden wurde, so kann doch vor Benutzung des Kompasses, wenn auch in ganz primitiver Form, auf offener See der Weg nur nach dem Stand und täglichen Lauf der Gestirne bestimmt worden sein. Auf der nördlichen Halbkugel mußte bei Tage der Stand der Sonne, bei Nacht der des Polarsternes und in geringerem Grade wohl auch der des Mondes und der übrigen Sterne als Wegweiser dienen, auf der südlichen Halbkugel hat man keinen dem Pole so nahestehenden hellen Stern, und die Orientierung war dementsprechend schwieriger. Es sind die hellen leicht durch ihre gegenseitige Stellung auffindbaren Sterne des südlichen Kreuzes, des Kentaur und auch wohl des Orion, welche zur Orientierung benutzt wurden. Der höchste Stand der Gestirne zeigt die Richtung des Meridians, die Orte ihres Auf- und Unterganges weisen nach Osten und Westen. Dabei wußte man schon sehr wohl besonders durch Vergleichung mit den Punkten, an denen die Sonne auf- und unterging, die Abweichungen der den einzelnen Sternen entsprechenden Punkte des Horizontes von der genauen Ost-West-Richtung. Aber immerhin waren die so gewonnenen Angaben für die Ortsbestimmungen auf dem Lande und noch mehr auf der See recht unsicher, solange man nicht durch Anwendung, wenn auch sehr primitiver Instrumente, zu jeder beliebigen Zeit, wann Sonne oder Gestirne sichtbar waren, mittels direkter Messungen Ort und Bewegungsrichtung des Schiffes feststellen konnte. Die ersten Instrumente, welche man zur See verwendete, waren auf die Benutzung der Lotrichtung begründet, wie sie wohl auch auf schwankendem Schiffe noch mit einiger Sicherheit durch ein an einem Faden aufgehängtes Gewicht bestimmt werden konnte. Es waren Vollkreise, die an einem Ringe von der Hand des Beobachters gehalten wurden, bei denen sich also ein diametral zum Orte des Ringes liegender Punkt senkrecht unter denselben stellte. Auf dem Umfange des Kreises war eine Teilung angebracht, die an der Stelle des Ringes 90 Grad und an dem dann horizontal liegenden Durchmesser 0 Grad zeigte. Ein einfaches Diopter, welches sich um den Kreuzungspunkt zweier radialer Speichen drehen ließ und über welches man hinweg nach der Sonne oder dem Gestirne visierte, ließ dann an der Teilung direkt die Höhen der Gestirne über dem Horizonte ablesen. Es ist klar, daß solche Instrumente, die unter dem Namen Astrolabien bis weit über das Mittelalter hinaus benutzt wurden, nur sehr geringe Genauigkeit gewähren konnten. Die Berichte der damaligen Seefahrer sagen, daß Unsicherheiten bis zu 1 Grad nicht selten waren. Ein interessantes Instrument ähnlicher Art war der sogenannte Seering. Dieser war ein Astrolabium ohne Alhidade und Speichen, dafür war am oberen Rande in etwa 45 Grad Abstand von dem zum Halten des Instrumentes ebenfalls angebrachten Ringe eine Öffnung in den Kreis geschnitten, welche die Gestalt eines rechten Winkels hatte, dessen Spitze eine feine Bohrung am inneren Rande des Kreises bil-

Die einfachsten Instrumente für geographische Ortsbestimmung.

dete. Die eine Seite der Bohrung stand dann senkrecht und die andere horizontal. Die Verlängerungen dieser Kanten trafen auf der gegenüberliegenden Seite des Kreises Stellen, welche um 180 Grad voneinander abstehen müssen. Den halben Kreis, welchen diese beiden Stellen zwischen sich fassen und welcher der Bohrung gegenüberliegt, teilte man dann in 90 Grad. Fielen die Sonnenstrahlen durch die feine Bohrung hindurch, so konnte an dieser die Höhe der Sonne abgelesen werden. Die Einführung dieses Seeringes war ein bedeutender Fortschritt gegenüber den alten Instrumenten; denn die Bestimmung der Sonnenhöhe wurde von der Stellung des Auges des Beobachters unabhängig, wenn auch die Verdoppelung der Winkel wieder einigermaßen aufgehoben wurde durch die gleich großen Fehler, welche die Schwankungen des Instrumentes beim Beobachten bedingten. Bei den erwähnten Instrumenten wird durch die Schwere des Instrumentes selbst die vertikale Richtung eines Durchmessers, also eines Punktes der Teilung, bestimmt, es kommt also kein besonderes Lot oder dergleichen zur Benutzung. Das wurde anders, als man später den auf dem Lande gebräuchlichen Quadranten auch auf See einführte, und zwar in der Weise, daß man den geteilten Kreisbogen nach unten kehrte und von dem Zentrum desselben ein Lot an der Teilung herabhängen ließ. Auf einer Seite des Quadranten, welche parallel mit dem das Zentrum und den 90. Gradpunkt verbindenden Radius verlief, brachte man Diopter an, durch welche man nach der Sonne oder den Gestirnen hinsah. Das herabhängende Lot spielte über der Teilung und mußte dann allerdings im Moment der richtigen Visur vom Beobachter auf der Teilung festgehalten werden, wenn nicht ein Gehilfe gleichzeitig die Ablesung vornehmen konnte. Mit einem solchen Instrument scheint auch Kolumbus auf seinen Reisen beobachtet zu haben.

Eine ganz wesentliche Verschärfung der Beobachtungen auf See gewährte der schon von Archimedes und Hipparch benutzte sogenannte Gradstock, Stab des Hipparch oder Jakobsstab, der von den Seeleuten viel benutzt wurde. Mit seiner Einführung wurde zugleich die Winkelmessung nicht mehr mit Bezugnahme auf die Lotrichtung, sondern mit Rücksicht auf die Lage des Horizontes, welcher selbst bei sehr bewegter See noch leicht als Trennungslinie zwischen Meereshorizont und Himmelsgewölbe als sogenannte Kimm wahrgenommen werden kann, übertragen. Der Gradstock besteht aus einem vierkantigen mit einer Teilung versehenen Stabe, auf welchem senkrecht zu seiner Längsrichtung sich ein zweiter Stab von geringerer Länge bewegen läßt. Regiomontan hat ihn zur Bestimmung des Durchmessers von Kometen und desjenigen der Sonne verwendet, wie aus der von ihm 1472 in Nürnberg verfaßten Schrift „de cometae magnitudine longitudineque“ hervorgeht. Das Instrument wurde bei den Höhenmessungen zur See so benutzt, daß man das Auge an das eine Ende des längeren Stabes brachte und den kürzeren, welcher von seiner Durchbohrung aus nach beiden Seiten gleich lang war, so weit vorschob, bis man über das eine Ende hinweg den Meereshorizont und über das andere Ende hin das anzuvisierende Gestirn

erblickte. Um die Größe des ganzen Instrumentes in zweckmäßigen Grenzen zu halten, benutzte man wohl bewegliche Stäbe von verschiedener Länge, für die dann auf den verschiedenen Seiten des Längsstabes entsprechende Teilungen angebracht waren. Wohl auch hat man gleichzeitig zwei solcher beweglichen Stäbe benutzt und über ihre Enden hinweg visiert. Das hatte den Zweck, den durch die Visierlinien eingeschlossenen Winkel vom Orte des Auges des Beobachters unabhängiger zu machen, um die Höhenmessungen zur See mit einer Sicherheit von wenigen Minuten zu erhalten. Neben dem Jakobsstab wurde aber auch der Quadrant in der Weise umgestaltet, daß man mit ihm die Höhenmessung direkt auf den Horizont beziehen konnte. Der englische Seefahrer Davis gab dem Instrument verschiedene Formen, wie aus seinem Werke „The Seamans Secrets", London 1594, hervorgeht, wo er diese neuen Konstruktionen beschreibt. Bei einer derselben war der Gradbogen gewissermaßen aus zwei verschiedenen Teilen zusammengesetzt, von denen der eine nach oben, der andere nach unten gekehrt war. Der obere Bogen war auf einem Längsstab verschiebbar und konnte um Stücke verschoben werden, die einer Winkeländerung von 10 Grad entsprachen. Der untere kleinere Bogen trug eine Teilung, auf welcher sich ein Diopter verschieben ließ. Bei der Beobachtung kehrte man der Sonne den Rücken, stellte den Querstab auf einen vollen 10. Gradstrich, der einem Winkel entsprach, der kleiner als die Sonnenhöhe war, dann ließ man den Schatten des oberen Endes dieses Stabes auf einen an dem von der Sonne abgekehrten Ende des Stabes angebrachten Diopter fallen und blickte durch dieses und das am kleineren Bogen verschiebbare Diopter nach dem Meereshorizonte. Dieses, den eigentlichen „Davis-Quadranten" darstellende Instrument führte in der Marine allgemein den Namen Back-Staff, weil man bei seiner Handhabung der Sonne den Rücken zukehren mußte. Spätere Verbesserungen haben das Instrument wesentlich dadurch vervollkommnet, daß man den beweglichen oberen Stab ebenfalls durch einen Bogen ersetzte und mit einem Diopter versah. Alle diese Instrumente aber hatten den großen Nachteil, daß man mit ihnen eigentlich nur bei Tage, nämlich durch Visieren nach der Sonne, beobachten konnte. Visuren nach den Sternen waren ungleich schwieriger und sind wohl nur mit Hilfe des Polarsternes und einiger weniger ganz hellen Gestirne, vielleicht auch der Planeten, ausgeführt worden. Eine Genauigkeit von einer Bogenminute, wie sie in manchen Berichten angeführt wird, lag wohl außerhalb der Möglichkeit.

Bestimmung der geographischen Breite.

Die geographische Breite des Schiffsortes bestimmte man allgemein dadurch, daß man im Moment der größten Höhe der Sonne den Winkel maß, welcher die Richtung nach ihrem Zentrum mit der Horizontalen einschließt. Diese Kulminationshöhe, vermindert um die Deklination der Sonne und von 90 Grad abgezogen, lieferte direkt die geographische Breite des Ortes. Bei Nacht trat an die Stelle der Sonne ein helles Gestirn oder auf der nördlichen Halbkugel der Polarstern, dessen Abstand vom Pole wenig über einen Grad beträgt. Die Bestimmung der geographischen Länge war

eine ungleich schwierigere Aufgabe, und bevor man nicht den Ort des Mondes am Himmel zu benutzen verstand, konnte dieselbe ausschließlich durch direkte Messung der Schiffsgeschwindigkeit und in Verbindung mit der Richtung des zurückgelegten Weges bestimmt werden. Wollte man einen Ort aufsuchen, der an einer nahezu von Nord nach Süd streichenden Küste gelegen war, so blieb nichts anderes übrig, als so weit nach Norden oder Süden zu segeln, bis man sich auf gleichem Parallel mit dem Ziel der Reise befand, und dann segelte man so gut es ging direkt nach Osten oder Westen, bis man die Küste erreichte. Dabei war es ausschließlich notwendig, sobald die Schiffsrechnung die Nähe der Küste vermuten ließ, von Bord aus scharfen Ausblick zu halten, um die Küste an einer zur Landung geeigneten Stelle zu erreichen. Mit der weiteren Entwicklung, die die Schiffahrt in dem Zeitalter der Entdeckungen gewann, wurde es aber notwendig, für die Bestimmung des Ortes eines Schiffes genauere Anhaltspunkte zu erhalten. War man durch die vorhandenen Instrumente, durch die Rechnungsmethoden und durch die bekannten Orte der Gestirne wohl in der Lage, die geographische Breite zu bestimmen, so war das im gleichen Maße für die Länge, wie eben bemerkt, nicht der Fall. Der Vorschlag, die Stellung des Mondes, welcher bekanntlich in etwa 29 Tagen einen Umlauf um die Erde vollendet, zur Längenbestimmung zu benutzen, war von weittragendster Bedeutung. Da aber ein Fehler in der Bestimmung der Rektaszension des Mondes eben wegen der Dauer der Umlaufszeit mit dem 28 bis 30fachen Betrag in das Resultat der geographischen Längenbestimmung eingeht, so wurde es eine dringende Notwendigkeit, den Vorausberechnungen des Mondlaufes und den Instrumenten zur Beobachtung eines Ortes am Himmel (zur Bestimmung seiner Rektaszension) die nötige Genauigkeit zu verleihen, wollte man anders aus der Benutzung der Rektaszension des Mondes zur Längenbestimmung wesentlichen Vorteil ziehen. Diese Einsicht hatte zur Folge, daß man vor allen Dingen auf die Verbesserung der Instrumente bedacht war. Das Mittel dazu gab der Hadleysche Spiegelsextant. Mit seiner Hilfe wurde es möglich, Winkelmessungen zur See mit bis dahin unerreichter Genauigkeit, nämlich bis auf die Zehntel einer Bogenminute mit einiger Sicherheit auszuführen, ohne auf die Lotrichtung oder auf die Kimmlinie als Ausgangspunkt der Messungen beschränkt zu sein. Man bestimmte mit Hilfe des Spiegelsextanten den Abstand des Mondes von einem Fixstern in der Ebene des durch Mond, Stern und Auge des Beobachters gehenden größten Kreises. Hatte man die anguläre Winkelentfernung des Mondes von einem solchen Stern bestimmt, so brauchte man dieselbe nur in Vergleich zu setzen mit demselben Winkel, den man zu einer bestimmten Zeit eines Ausgangsmeridians am Erdmittelpunkt gemessen haben würde. Um den letzteren Winkel aber bestimmen zu können, wurde es erforderlich, die Bewegung des Mondes in seiner Bahn mit genügender Genauigkeit zu kennen. Diese Forderung bedingte einen Ausbau der bis dahin in der Form gewöhnlicher Kalender gegebenen Vorausberechnungen des Mondortes.

Bestimmung der geographischen Länge mit Hilfe des Mondes.

Kalender und Jahrbücher (Ephemeriden).

Die Angaben des Kalenders, wie sie etwa bis zur Mitte des 15. Jahrhunderts gebräuchlich waren, bezogen sich im wesentlichen auf eine Aufzählung der Wochentage und der an ihnen zu feiernden Feste. Daneben enthielten sie die Stellungen des Mondes und der Sonne zueinander, wohl auch die der größeren Planeten zur Sonne, die sogenannten Adspekten, und außer diesen noch eine Anzahl nebensächlicher, auf religiöse Angelegenheiten oder landwirtschaftliche Dinge bezügliche Angaben. Diese Form reichte selbstverständlich für die Benutzung zu astronomischen Rechnungen bei weitem nicht mehr aus. So entwickelten sich aus den einfachen Kalendern die uns heute unter dem Namen: Ephemeriden und Jahrbücher bekannten Sammlungen genauer astronomischer Vorausberechnungen über den Lauf der Sonne, des Mondes und der Planeten sowie über die Orte der hauptsächlichsten sogenannten Fundamentalsterne. Es ist Regiomontan das Verdienst zuzuschreiben, solche Sammlungen um das Ende des 15. Jahrhunderts zuerst verfaßt und veröffentlicht zu haben. Die Erfindung der Buchdruckerkunst hatte Mittel an die Hand gegeben, diese Tafeln in weiterem Umfange zu vervielfältigen und allgemein in den Handel zu bringen. Im Laufe des 17. Jahrhunderts wurde eine große Anzahl solcher Ephemeriden verfaßt, darunter auch diejenigen, welche Johannes Kepler unter dem Namen „Ephemerides novae motum coelestium ab anno 1617—1636“ herausgab. Diese Ephemeriden wurden nach und nach vervollständigt in ihren Angaben, bis aus ihnen die ersten gegenwärtig noch im Gebrauch befindlichen Jahrbücher entstanden. Das älteste derselben ist die 1678 von Jean Picard für das Jahr 1679 herausgegebene „Connaissance des Temps“, die heute noch von dem französischen Institut „Bureau des Longitudes“ herausgegeben wird. Ein anderes dieser Jahrbücher, welches ebenfalls heute noch regelmäßig erscheint, wurde von dem englischen Astronomen Maskelyne im Jahre 1766 zum ersten Male herausgegeben. Es ist das der von dem extra zu diesem Zwecke in London gegründeten „Board of Longitude“ berechnete „Nautical Almanac“. Erst später folgten die anderen Nationen mit ähnlichen Ephemeridensammlungen, so Cäsaris in Mailand im Jahre 1774 und Elerd Bode zu Berlin im Jahre 1776 mit dem noch jetzt jährlich erscheinenden Berliner Astronomischen Jahrbuch. Außer diesen Jahrbüchern erscheinen heute noch eine ganze Anzahl andere, die entweder die gleichen Zwecke wie die genannten verfolgen — eine Zusammenstellung der astronomischen Daten mit größtmöglicher Genauigkeit zu geben — oder in einfacherer und gekürzter Form nur rein nautischen Zwecken dienen.

Die Angaben der Jahrbücher, welche zunächst ausschließlich den Zweck verfolgten, die ausgeführten Beobachtungen zu berechnen und sie für die Ortsbestimmung der Gestirne und für diejenige auf der Erde zu verwenden, werden heute natürlich gleichzeitig zur Kontrolle für die Richtigkeit der den Berechnungen der Ephemeriden zugrunde liegenden Daten benutzt. Die Unterschiede, welche die Beobachtungen gegenüber den vorausberechneten Angaben zeigen, bilden dann den Ausgangspunkt für die Verbesserung der kosmischen Bewegungen.

Verbesserung der Theorie der Mondbewegung und der Tafeln der Mondorte in den Ephemeriden

Die Berechnung der ausgeführten Mondbeobachtungen ließ sehr bald erkennen, daß die Angaben der Jahrbücher noch nicht die Genauigkeit besaßen, welche einer vollständigen Ausnutzung der durch die verbesserten Instrumente erhaltenen Beobachtungen gerecht wurden. Das Problem der Längenbestimmung zur See ist sowohl für die Verbesserung der Instrumente als ganz im besonderen auch für den Ausbau der Theorie der Mondbewegung von höchster Bedeutung geworden, und man kann wohl sagen, daß gerade die Ausgestaltung der Mondtheorie wegen der Schwierigkeit, die sie damals bot und heute noch bietet, Veranlassung gab, alle sie bestimmenden Faktoren mit einer größeren Genauigkeit festzulegen. Das britische Reich, welches von jeher das größte Interesse an der Vervollkommnung der nautischen Hilfsmittel besaß, hatte im Jahre 1714 einen hohen Preis ausgesetzt für die Verbesserung der Hilfsmittel zur Bestimmung der Längen zur See. Nach allen Richtungen wurde daran gearbeitet, der gestellten Forderung zu entsprechen. Man verbesserte den Hadleyschen Spiegelsextanten, bis er die heute noch gebräuchliche Form des Sextanten oder des Vollkreises erhielt, man konstruierte Uhren, die durch ihre Einrichtungen es ermöglichten, auf dem schwankenden Schiffe einen gleichmäßigen Gang zu bewahren, um so die Beobachtungen zu verschiedenen Zeiten miteinander vergleichbar zu machen, und vor allem wurden die Vorausberechnungen der Mondorte durch die vorzüglichen Beobachtungen des Göttinger Astronomen Tobias Mayer zu wesentlich größerer Genauigkeit gebracht. Es haben dann auch tatsächlich der englische Uhrmacher Harrison und Tobias Mayer erhebliche Teile des ausgesetzten Preises, jener für Verbesserung der Schiffsuhren (Chronometer) und dieser für seine Verbesserung der Mondtafeln, erhalten. Bis vor wenigen Jahren hat ein steter Wettstreit zwischen der Verbesserung der Beobachtungsinstrumente und der Herstellung möglichst genauer Vorausberechnungen der Mondorte bestanden, soweit es sich um die Ableitung geographischer Längen zur See handelte. Die Theorie des Mondes ist bis auf den heutigen Tag noch nicht mit einer solchen Schärfe durchgebildet, daß man den Ort des Mondzentrums bis auf wenige Bogensekunden mit Sicherheit auf längere Perioden voraussagen könnte. Es sind aber in den letzten Jahren an die Stelle der Mondbeobachtungen ganz andere Methoden zur Längenbestimmung auf See getreten und gegenwärtig noch in voller Ausbildung begriffen, so daß man wohl sagen kann, daß die Benutzung der Mondbeobachtungen zum Zwecke der Längenbestimmung heute auf dem Aussterbeetat steht.

Waren es zunächst die Erfordernisse der Schiffahrt, welche die Ausbildung der Methoden zur Bestimmung des Mondortes bedingten, so sind mit den Erweiterungen unserer Kenntnis fremder Länder und der damit bedingten genaueren Ortsbestimmung einzelner Örtlichkeiten in diesen fremden Gebieten andere Methoden der Längenbestimmung zur Ausbildung gelangt, als man sie an Bord anzuwenden pflegte. Dort waren es ausschließlich die sogenannten Monddistanzen, welche oben schon ihrem Wesen nach erwähnt

wurden. An Land aber, wo man mit fest aufgestellten Instrumenten arbeiten konnte, bildeten sich die Beobachtungen der Kulminationszeiten des Mondes und die der Messungen seiner Zenitdistanz besonders aus. Beide Verfahren dienen dazu, die Rektaszension des Mondzentrums direkt zu bestimmen. Die Fehler, welche man bei solchen Rektaszensionsbestimmungen begeht, mögen sie nun nach der einen oder anderen Methode ausgeführt sein, beeinflussen die Längenbestimmung immer um den etwa 30fachen Betrag. Das ist anders, sobald man an die Stelle des winkelmessenden Instrumentes zur Bestimmung des Abstandes eines Gestirnes vom Mondzentrum zur Bestimmung seiner Rektaszension auf direktem Wege den Mondradius selbst treten läßt. Das ist der Fall bei der Bestimmung der geographischen Längen aus Sternbedeckungen; dabei wird der Radius des Mondes selbst den Abstand des Gestirnes vom Mondzentrum angeben, so daß diese Beobachtung ausschließlich von der Genauigkeit abhängig ist, mit welcher der Zeitpunkt des Verschwindens oder Auftauchens eines Gestirnes am Rande des Mondes angegeben werden kann.

Mondtafeln von Hansen.

Bei allen geographischen Längenbestimmungen kommt es doch schließlich darauf an, den Unterschied in den Ortszeiten zweier verschiedener Punkte der Erde, von denen der eine auf dem Ausgangsmeridian angenommen wird, zu bestimmen. Alle auf die Bewegung des Mondes gegründeten Methoden sind aber bis auf diejenige der Mondkulmination abhängig von den Dimensionen unserer Erde. Da alle Vorausberechnungen, die über den Lauf des Mondes in den Ephemeridensammlungen gegeben werden können, stets nur, da sie für alle Punkte der Erde gleichmäßig Geltung besitzen sollen, auf den Mittelpunkt der Erde bezogen werden können, so ist es notwendig, die an irgendeinem Punkte der Erde ausgeführten Messungen des angulären Abstandes zwischen Mond und Gestirn, oder diejenige gegenüber einer Fundamentalrichtung auf den Mittelpunkt der Erde zu reduzieren, d. h. aus den direkten Messungsresultaten diejenigen Winkel abzuleiten, welche man gemessen haben würde, wenn man die Messungen am Mittelpunkt der Erde ausgeführt haben würde. Zu diesen Reduktionen ist es aber wiederum notwendig, die Dimensionen der Erde nicht nur sehr genau zu kennen, sondern auch die Größe des Mondes und seine jeweilige Entfernung von der Erde, also wiederum Elemente, welche nur aus einer genauen Kenntnis der Theorie der Mondbewegung gefolgert werden können. Wesentliche Verbesserungen dieser Theorie hat der Astronom Hansen gegeben, der auf Grund einer umfassenden Zusammenstellung aller bis dahin bekannt gewordenen Beobachtungen in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts eine neue vollständige Bearbeitung der Mondbewegung vornahm und alle für diese in Betracht kommenden Konstanten, vor allem die Massen der Planeten sowie die Elemente der Mondbahn und diejenigen, welche die Größe und Maße des Mondes bestimmen, als Unbekannte in seine Berechnungen aufnahm. Aus diesen Untersuchungen sind schließlich Tafeln der Mondbewegung hervorgegangen, die bis in die Mitte der 70er Jahre allgemein in

Benutzung waren und nach denen die Vorausberechnungen in den Jahrbüchern erfolgten. Aber schon wenige Jahre nach der Fertigstellung der Grundlagen dieser Berechnungen zeigte sich, daß die vorausberechneten Mondorte nicht in genügender Weise mit den Resultaten der regelmäßig fortgesetzten Beobachtungen übereinstimmten. Da die Unterschiede nach und nach erhebliche Beträge erreichten, unternahm der amerikanische Astronom Newcomb die Neubestimmung eines Teiles der Elemente, auf denen die Hansenschen Tafeln beruhen. Er leitete aus dem inzwischen angesammelten Beobachtungsmaterial Korrektionen ab, die man an die nach den Hansenschen Tafeln berechneten Mondorte anbringen muß, um diejenige Position zu erhalten, welche der damaligen Kenntnis der Mondbewegungen entspricht. Das sind die sogenannten Newcombschen Korrektionen. Die betreffenden Arbeiten Newcombs sind in einer umfangreichen Schriftfolge erschienen, welche zugleich alle Untersuchungen enthält, die dieser bedeutende Forscher auf dem Gebiete der Planetenbewegung ausführte. Denn gleichzeitig mit den Neuberechnungen, welche die Bewegung des Mondes betrafen, hat er auch diejenigen der Sonne und der großen Planeten von neuem bearbeitet.

Die Beobachtungen des Mondes bieten dadurch eine gewisse Schwierigkeit, daß sowohl bei Durchgangsbeobachtungen als auch bei Messungen von Zenitdistanzen selbstverständlich immer nur ein Rand desselben zu beobachten ist, mag das nun für Rektaszensionsbestimmungen der vorausgehende oder der folgende, für Deklinationsbestimmungen der obere oder der untere Rand sein. Nur in seltenen Fällen wird zur Zeit des Vollmondes die Stellung von Mond, Erde und Sonne zueinander eine solche sein, daß tatsächlich die uns zugewandte Seite des Mondes in ihrer ganzen Ausdehnung beleuchtet erscheint. Nur dann wird es möglich sein, die Messungen auf beide Ränder zugleich auszudehnen und diese Messungen, welche für die Theorie stets auf den Mittelpunkt des Mondes bezogen werden müssen, unabhängig von dem Wert des scheinbaren Mondradius zu machen, wie das für die Beobachtungen der Sonne ja stets der Fall ist. Besonders günstig gestaltet sich die Bestimmung des Mondradius dann, wenn uns der Mond total verfinstert erscheint. Es lassen sich in diesem Falle die Ein- und Austritte auch schwächerer Gestirne an den Mondrändern beobachten, und die Dauer der Bedeckungen dieser Gestirne durch den Mond gibt ein gutes Mittel für die Bestimmung seiner Dimension, zumal wenn der Mond zur Zeit einer totalen Mondfinsternis sich gerade in der Nähe der Plejaden, der Hyaden oder der Präsepe (der oben schon erwähnten „Krippe“) befindet, Sterngruppen, deren einzelne Komponenten sehr genau bezüglich ihrer gegenseitigen Stellung durch besondere Vermessungen zu verschiedenen Zeiten bestimmt worden sind. Durch die Untersuchungen Newcombs war es am Ende des vorigen Jahrhunderts gelungen, die Vorausberechnungen der Mondpositionen in den Jahrbüchern derartig zu korrigieren, daß man mit ihrer Hilfe bei der Bestimmung der Längendifferenzen aus Mondbeobachtungen zu einer erheblicheren Genauigkeit gelangen konnte. Im besonderen waren es vier Methoden, welche zur

Die Beobachtungen des Mondes bieten gewisse Schwierigkeiten. — Beobachtungsmethoden.

Bestimmung von Längendifferenzen ausgeführt wurden: die Mondkulminationen, die Mondhöhen, die Sternbedeckungen und die Monddistanzen. Von diesen Methoden verlangt besonders die erstere eine feste Aufstellung der Instrumente, ist mit Vorteil also nur auf dem Lande durchzuführen. Mondhöhen kann man auch wohl mit Instrumenten beobachten, die aus freier Hand, also an Bord gebraucht werden können, aber die mit ihnen zu erreichende Genauigkeit entspricht nicht derjenigen, die diese Methode sonst bei Benutzung größerer Instrumente zu gewähren imstande ist. Die Beobachtung von Sternbedeckungen ist mit jedem beliebigen Fernrohr möglich, und es bedarf dazu keinerlei fester Aufstellung desselben. Diese Vorübergänge des Mondes vor Gestirnen sind aber immerhin verhältnismäßig selten, solange es sich um die Bedeckung hellerer Gestirne handelt, und schwächere Gestirne, etwa solche unter 6. Größe, sind mit mäßigen optischen Hilfsmitteln in der Nähe des hellen Mondes nicht mehr mit Sicherheit zu beobachten. Insbesondere gilt das für das Verschwinden und Auftauchen am hellen Rande. Schon für Gestirne 3. und 4. Größe werden diese Phänomene nur unsicher wahrnehmbar. Für einen bestimmten Erdort werden im Laufe eines Jahres etwa rund 200 Gestirne innerhalb der sechs ersten Größenklassen vom Monde bedeckt, solange dieser über dem Horizont des Ortes sich befindet. Die Erfahrung hat gelehrt, daß von dieser Anzahl von Sternbedeckungen wiederum selbst in klimatisch günstigen Orten nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl tatsächlich beobachtet werden kann. Es bleibt daher immer dem Zufall überlassen, ob im gegebenen Moment eine solche Bedeckung beobachtet werden kann. Bei Gelegenheit der Expeditionen, welche 1874 und 1882 zur Beobachtung der Vorübergänge der Venus vor der Sonnenscheibe von Deutschland ausgesandt waren, hatte man besonders zu dem Zweck der Beobachtung von Sternbedeckungen größere Fernrohre mitgenommen und dementsprechend mehrere Tausende von Bedeckungen auch schwächerer Gestirne vorausberechnet. Die erzielten Resultate blieben weit hinter jeder Erwartung zurück. Von den acht in beiden Fällen ausgesandten Hauptexpeditionen wurden im ganzen ca. 95 Bedeckungen beobachtet[1]), obgleich Fachastronomen eifrig auf jede Gelegenheit geachtet hatten, diese Phänomene zu beobachten. Aus diesen Erfahrungen geht hervor, daß man bei Reisen zu Lande bei Benutzung stärkerer optischer Hilfsmittel wohl noch erwarten kann, mit Hilfe von Sternbedeckungen Längenbestimmungen auszuführen; daß dagegen zur See nur wenig Erfolg aus dieser Methode gezogen werden kann. Dagegen ist auf See in früheren Jahren außerordentlich vielfach Gebrauch gemacht worden von den oben erwähnten Distanzmessungen zwischen Mond und geeigneten Gestirnen. Bis in die letzten Jahre enthielten alle Jahrbücher umfangreiche Listen, welche die wahren Distanzen des Mondes von hellen Gestirnen, die sich etwa in der Bahn des Mondes befinden, von drei zu drei Stunden angaben. Die gegebenen Winkelabstände waren für die Zeiten des Jahrbuchmeridianes so be-

Sternbedeckungen durch den Mond.

Monddistanzen.

1) Davon 1874 15 und 1882 ca. 80, darunter aber nur 5 oder 6 an Sternen, die heller als 7. Größe sind.

rechnet, daß man aus ihnen den scheinbaren Abstand des Mondzentrums von den betreffenden Gestirnen entnehmen konnte, wie man sie vom Erdmittelpunkt aus beobachtet haben würde, also den sogenannten geozentrischen Abstand. Die Reduktion der an einem Orte der Oberfläche der Erde beobachteten Abstände auf das Erdzentrum ist eine verhältnismäßig umständliche Arbeit. Die Methoden zu diesen Rechnungen haben Astronomen und Mathematiker vielfach beschäftigt, und es sind eine größere Anzahl Rechnungsvorschriften, die zum Teil theoretisch interessant sind, gegeben worden. Erheblichen praktischen Wert besitzen dieselben heute nicht mehr. Die an Bord gebräuchlichen Instrumente sind nicht imstande, eine so große Genauigkeit der Messung zu liefern, wie sie für die heutigen Bedingungen der Schiffahrt gefordert werden muß. Eine Unsicherheit von etwa 10 Bogensekunden muß auch den besten Messungen dieser Art heute noch zugeschrieben werden. Da aber oben schon bemerkt worden ist, daß diese Unsicherheit etwa mit dem 30fachen Betrag das Resultat der Längenbestimmung beeinflußt, so würden diese also 300 Bogensekunden, d. h. 20 Zeitsekunden, unsicher bleiben. Eine Zeitsekunde beträgt im größten Kreis ungefähr 450 m, 20 Zeitsekunden also 9 km; das ist ein Betrag, den heutigentags ein mittelschnelles Schiff in dem Bruchteil einer Stunde zurücklegt. Ein anderer Grund für die den heutigen Verhältnissen der Schiffahrt nicht mehr genügende Genauigkeit der Monddistanzen ist darin zu suchen, daß die Bestimmung der Zeit des Ausgangsmeridians durch die vielfachen Verbesserungen, welche die Schiffsuhren im Laufe der Zeit erfahren haben, sehr bedeutend an Genauigkeit gewonnen hat, und daß andererseits Mittel erfunden wurden, die die Länge des von dem Schiffe zurückgelegten Weges sehr genau zu ermitteln gestatten. Auch die Kompaßeinrichtungen und die Methoden, den Einfluß, welchen das in dem Schiffe enthaltene Eisen auf die Angaben des Kompasses ausübt, aus den Kursangaben zu eliminieren, sind in den letzten Dezennien derart verbessert worden, daß mit ihrer Hilfe eine sehr genaue Schiffsrechnung, ein genaues Besteck, wie der Seemann sagt, gegeben werden kann. Die Ausbildung der Dampfschiffahrt hat auch bewirkt, daß die Schiffe unabhängig von Wind und Wetter ihren Kurs halten können. Alle diese Umstände gestatten heutigentags auf Grund der einfachen Besteckrechnung mit Zuziehung der Bestimmung der Ortszeit, wie sie aus Höhenmessungen der Sonne oder eines Gestirnes bei größerem Stundenwinkel desselben jederzeit gefunden werden können, eine wesentlich genauere Ortsbestimmung, als es die Messung von Monddistanzen jemals gekonnt hätte. Aus diesem Grunde sind in den letzten Jahrgängen fast aller astronomischer Ephemeriden und Nautischer Jahrbücher die umständlichen Angaben der Monddistanzen in Wegfall gekommen.

Schiffsuhren (Box-Chronometer) und Logg-Einrichtungen, Schiffs (Besteck-) Rechnung.

Es ist Vorschrift, daß jedes größere Schiff, welches Reisen über die Ozeane macht, mehrere Chronometer an Bord führen muß, so daß mit ihrer Hilfe eine gesicherte Längenbestimmung gewährleistet ist. Obgleich es geglückt ist, sehr gute Uhren herzustellen, so ist es doch nicht möglich, mit-

tels derselben die Ortszeit von Greenwich, Paris oder Washington auf längere Zeit anzugeben, wenn diese Uhren einem weiteren Transport über Land ausgesetzt werden. Für die in neuerer Zeit vielfach notwendig gewordenen Arbeiten zur Abgrenzung kolonialer Gebiete muß man daher immer noch seine Zuflucht zu den Mondbeobachtungen zwecks Längenbestimmungen nehmen. Vor allem sind es die zwei zuerst genannten Methoden, welche dabei in Betracht kommen. Es ist deshalb keineswegs überflüssig geworden, den Lauf des Mondes fortwährend zu verfolgen, natürlich ganz abgesehen davon, daß die Bewegungen des Mondes an sich als Teil unseres Planetensystems von hohem astronomischen Interesse sind. Solche Beobachtungen haben wiederum gezeigt, daß auch die von Newcomb Ende der 70er Jahre abgeleiteten Korrektionen der Mondtafeln heute den Beobachtungsresultaten nicht mehr entsprechen. Es sind offenbar Kräfte vorhanden, welche die Bewegung des Mondes beeinflussen, und deren Ursachen und Größe uns noch nicht mit genügender Sicherheit bekannt sind; denn die Abweichungen der beobachteten Mondorte von den auf Grund der Newcombschen Untersuchungen vorausberechneten sind im Lauf der Jahre schon wieder so groß geworden, daß ihre Nichtberücksichtigung in den Berechnungen der Längenbestimmungen erhebliche Fehler verursacht. Wirklich zuverlässige Resultate können daher aus den Beobachtungen des Mondes zu Längenbestimmungszwecken nur erhalten werden, wenn nahezu gleichzeitig mit den im Felde ausgeführten Beobachtungen auch solche an festen Observatorien, deren Längendifferenzen gegenüber dem Ausgangsmeridian bekannt sind, angestellt werden. Es sind danach die verschiedensten Gründe vorhanden, in das Beobachtungsprogramm der Sternwarten die regelmäßigen Beobachtungen der Mondpositionen mit aufzunehmen.

Wert guter Mondbeobachtungen.

Die Bestimmung des Ortes eines Schiffes erfolgt heutigentags zumeist nach einer Methode, welche schon zu Ende des 18. Jahrhunderts von dem Franzosen St. Hilaire angegeben worden ist und gegenwärtig unter dem Namen der „Standlinienmethode“ sich großer Verbreitung erfreut. Sie beruht darauf, daß man durch Beobachtung des Abstandes zweier Gestirne vom Zenit zwei Kreise bestimmt, auf denen beiden das Schiff sich befinden muß. Diese Kreise schneiden sich in zwei Punkten, einer dieser Punkte muß der Schiffsort sein. Könnte man in eine Karte oder auf einen Globus die Kreise wirklich eintragen, deren sphärischer Radius der Abstand der beiden Gestirne vom Zenit und deren Mittelpunkte diejenigen Stellen auf der Erde sein würden, für welche das beobachtete Gestirn sich genau im Zenit befindet, so gäbe einer der Durchschnittspunkte der beiden Kreise direkt den Schiffsort an. Sind die beiden Sterne derartig ausgewählt, daß ihr azimutaler Abstand nahezu 90 Grad beträgt, und sind die Zenitdistanzen nicht zu klein, was schon durch die Art der Beobachtung auf See bedingt wird, so kann man nicht zweifelhaft sein, welcher der beiden Durchschnittspunkte zu wählen ist, denn beide liegen sehr weit auseinander. Diese Methode ist also außerordentlich einfach, nur die praktische Ausführung bringt einige um-

Standlinienmethoden (Sumnerlinien).

ständlichere Reduktionen und Abänderungen der rechnerischen oder graphischen Darstellung mit sich. Man kann keine Karte konstruieren von solchen Dimensionen, daß man die gegebenen Kreise wirklich einzeichnen könnte, und außerdem würden diese Kugelkreise sich auf den Karten nicht als Kreise darstellen. Man begnügt sich deshalb in der Praxis mit kleinen Stücken dieser Kreise oder setzt an deren Stelle ihre Tangenten. Aus diesem Verfahren folgt der Name „Standlinienmethode". Durch die weite Verbreitung und die Einfachheit der gebräuchlichen Rechnungsvorschriften hat die Standlinienmethode fast alle anderen Arten der Schiffsrechnung verdrängt. Dazu kommt, daß bei der Zuverlässigkeit der Chronometer und der Sicherheit, mit welcher Richtung und Geschwindigkeit des Schiffes durch Kompaß und Logg bestimmt werden können, auch die für die schärfere Rechnung der Standlinienmethode notwendigen geschätzten Längen und Breiten der Schiffsorte mit großer Sicherheit gegeben werden können. Die Chronometerkontrolle wird ganz erheblich unterstützt durch die vielen Stationen an unseren und fremden Küsten, an denen, wie schon im vorigen Abschnitt erwähnt wurde, Einrichtungen getroffen sind, um den Beobachtern an Bord eine genaue Kontrolle ihrer Uhren zu ermöglichen. Das sind die sogenannten Zeitstationen. An ihnen wird in einem bestimmt festgesetzten Moment, für welchen man zumeist Greenwich Mittag wählt, oder einen davon um eine ganze Stunde abweichenden Zeitpunkt, ein Signal gegeben. Dasselbe besteht in den meisten Fällen aus einer an einem hohen Maste emporgezogenen großen Kugel, die im Momente der Signalgebung an dem Maste heruntersinkt. An anderen Orten, so z. B. vielfach an der englischen Küste, werden im Moment des Greenwicher Mittags Kanonenschüsse abgegeben. Diese Signale werden zum großen Teil automatisch durch Uhren veranlaßt, die auf nahen Sternwarten unter steter Kontrolle gehalten werden. Allen Schiffen, die in der Nähe solcher Zeitstationen sich befinden, wird damit die Möglichkeit gegeben, ihre Schiffsuhren zu kontrollieren und die Veränderungen derselben, die sie im Laufe der Reise erfahren haben, zu bestimmen und so sich die Möglichkeit zu verschaffen, die Vorausberechnungen des Standes dieser Uhren mit größerer Sicherheit weiterzuführen. In den Nautischen Jahrbüchern finden sich Verzeichnisse dieser Zeitstationen und die Beschreibung der Art der Signale sowie die Angaben des Momentes, in welchem dieselben erfolgen. Die Umspannung der Erde durch die großen Kabelnetze hat es auch ermöglicht, solche Zeitsignalstationen auf gewissen Inselgruppen, z. B. den Azoren, welche die transatlantischen Kabel passieren, zu errichten, so daß auch mitten im Ozean unabhängig von der Nähe eines Observatoriums doch sichere Zeitsignale gegeben werden können.

Zeitsignalwesen

In ein ganz neues Stadium ist die Signalgebung sowohl an Land als auch für See getreten, als es gelang, funkentelegraphische Signale auf weite Strecken zu geben und diese mit verhältnismäßig einfachen Mitteln aufzunehmen. An vielen Punkten der Erde sind jetzt Stationen eingerichtet, von denen aus man durch radiotelegraphische Signale auf weite Strecken hin

Mitteilungen machen kann. Diese Stationen, welche im allgemeinen Verkehrsinteressen oder der Weitergabe politischer Nachrichten dienen, werden gleichzeitig dazu benutzt, in bestimmter Anordnung Signale zu geben, aus denen, wie es bei den gewöhnlichen Zeitsignalstationen der Fall ist, der Moment des Greenwicher, des Pariser oder Washingtoner Mittags ersehen werden kann. Diese Signale werden unter Kontrolle nahe gelegener Observatorien abgegeben und ermöglichen es, im weiten Umkreis bis auf Tausende von Kilometern die an Bord befindlichen Chronometer oder die Uhren der Städte dadurch zu kontrollieren und ihre jeweiligen Abweichungen von der Zeit, welche sie angeben sollen, täglich ein- oder zweimal zu bestimmen. Es gelingt leicht, mit Hilfe dieser Signalstationen den Schiffen, welche, sobald sie eine größere Anzahl von Passagieren an Bord haben, mit Empfangs- und Geberstationen einfacherer Art ausgerüstet sein müssen, die Zeitangaben zu übermitteln. Bei der zu erwartenden weiteren Ausdehnung und Vervollkommnung der funkentelegraphischen Einrichtungen wird es für die Großschiffahrt bald nicht mehr notwendig sein, durch astronomische Beobachtungen für die Kenntnis der Zeit eines Nullmeridianes zu sorgen. Das schließt natürlich nicht aus, daß sowohl zu Lande als zur See die astronomischen Ortsbestimmungen für alle Zukunft der Beobachtungen der Gestirne bedürfen. Denn einmal ist eine Bestimmung der Längendifferenz nur möglich, wenn man nicht nur die Zeit des Nullmeridians, sondern auch die Ortszeit kennt, und außerdem ist die zweite Koordinate, die geographische Breite, auf astronomischem Wege nur durch Höhenmessungen von Gestirnen zu bestimmen.

Grenzvermessungen.

Die Besitzergreifung fremder Landgebiete durch die zivilisierten Staaten hat dazu geführt, eine scharfe Abgrenzung dieser den einzelnen Staaten zugehörigen Gebietsteile zu bedingen. Je wichtiger für die großen Staaten die Erwerbung kolonialer Gebietsteile geworden ist, einmal um aus ihnen die Rohprodukte für die Industrie unabhängig von anderen Staaten zu gewinnen, dann aber auch um sich Gebiete zu verschaffen, nach denen unter Umständen eine Auswanderung ohne Aufgabe der Nationalität erfolgen kann, um so mehr ist auch eine sichere Abgrenzung notwendig geworden; denn besonders ertragreiche oder klimatisch bevorzugte Landesteile würden leicht zu häufigen Streitigkeiten führen. Gerade diejenigen Länder, aus denen wertvolle Rohprodukte ausgeführt werden können, sind dadurch zu äußerst wertvollen Gebieten geworden, und es ist heute nicht nur notwendig, sie im allgemeinen etwa nach Völkergruppen oder einzelnen Stämmen abzugrenzen, zumal diese leicht bedeutenden Verschiebungen unterworfen sein können, sondern es müssen, ebenso wie in den zivilisierten Staaten, scharfe Grenzfestsetzungen erfolgen.

Gewöhnlich ist der Verlauf dieser Grenzbestimmungen in der Weise vor sich gegangen, daß zunächst die Forscher, welche fremde Gebiete erkundeten, im Interesse ihrer Heimatstaaten mit den Häuptlingen der bereisten Gebiete Verträge abschlossen, nach denen die diesen Häuptlingen unterstehenden Gebiete, meist sehr wenig scharf begrenzte Distrikte, sich dem

Schutze des Heimatstaates unterstellten. War es gelungen, mit anderen ebenfalls in gleicher Gegend interessierten Staaten Übereinkommen zu treffen zur gegenseitigen Anerkennung solcher Verträge, so hatte man gewöhnlich nur die Möglichkeit, auf diplomatischem Wege Festsetzungen über den Verlauf der Grenze zwischen den einzelnen Interessensphären zu treffen, und diese Bestimmungen konnten sich naturgemäß, da man die abzugrenzenden Landesgebiete ihren geographischen Verhältnissen nach meistens gar nicht kannte, darauf beschränken, auf den mehr oder weniger vollständigen Karten ideelle Grenzen festzusetzen, die durch Breiten- oder Längengrade definiert wurden. Macht sich das Bedürfnis geltend, durch Auffindung bestimmter Produktionsgebiete, etwa wertvoller Erze, Kautschuk oder anderer Produkte, oder auch wohl wegen Festsetzung von Schiffahrtswegen die angenommenen Grenzlinien tatsächlich im Lande selbst aufzusuchen und zu bestimmen, so werden zu diesem Zweck besondere Expeditionen ausgerüstet, denen astronomisch und geodätisch gebildete Mitglieder beigegeben sind, um die Absteckung der festgesetzten Grenzlinien und die Aufnahme der Grenzgebiete vorzunehmen. Alle Methoden, welche zur Bestimmung der geographischen Breite und der Längendifferenz unter solchen Verhältnissen anwendbar sind, werden durch die Astronomen dieser Expeditionen zu ihren Zwecken benutzt. Die Breitenbestimmungen erfolgen fast ausschließlich durch Messungen der Zenitdistanzen von Gestirnen in der Nähe des Meridians. Die Längenbestimmungen aber sind in diesen Fällen bis in die neueste Zeit noch auf die Beobachtung der Mondrektaszensionen angewiesen. Erst in diesem Jahre hat man Versuche angestellt, auch auf solchen Grenzexpeditionen von der Funkentelegraphie Gebrauch zu machen. Allerdings haben sich bei Versuchen, die jüngst zwischen Paris und einigen Orten Algiers angestellt worden sind, mancherlei Umstände ergeben, die es zweifelhaft erscheinen lassen, ob in Gebieten, die in weitem Maße vom tropischen Urwald bedeckt sind, eine Signalgebung auf weitere Strecken möglich sein wird. Deutschland hat die Expeditionen, welche zur Festlegung der Grenzen der neuerworbenen Gebietsteile in Kamerun gegenwärtig in Tätigkeit sind, mit Einrichtungen für den Empfang von Zeitsignalen durch Funkentelegraphie ausgerüstet; ebenso sind auch die französischen Abteilungen dieser Expeditionen mit entsprechenden Apparaten versehen. In Duala, in Liebreville, in Brazzaville und einigen anderen Orten des französischen Afrika sind Sendestationen für drahtlose Telegraphie errichtet, und es bleibt abzuwarten, ob diese Versuche zu entsprechenden Resultaten führen werden. Sollte der Empfang der von den genannten Funkenstationen gegebenen Signale in den Grenzgebieten möglich sein, so würde das eine außerordentliche Vereinfachung und Verschärfung der astronomischen Arbeiten der Grenzexpeditionen gewähren.

Veränderlichkeit der geographischen Koordinaten, Polhöhenschwankungen.

Die rein praktischen Bedürfnisse können mit der Genauigkeit, mit denen die Orte der Gestirne bekannt sind, wohl in vollem Maße befriedigt werden. Aber die astronomische Forschung kann selbstverständlich dabei nicht stehen

bleiben, und die fortgesetzte Vergleichung älterer und neuerer Beobachtungen hatte schon den Königsberger Astronomen Bessel veranlaßt, die Vermutung auszusprechen, daß alle Resultate astronomischer Beobachtungen noch von einer kleinen Veränderung in der Stellung der Umdrehungsachse unserer Erde beeinflußt würden. Erst in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts ist es gelungen, mit Sicherheit nachzuweisen, daß tatsächlich eine solche Veränderung in der Lage der Umdrehungsachse der Erde vorhanden ist. Der Bonner Astronom Küstner zeigte auf Grund einer in Berlin ausgeführten Beobachtungsreihe, daß der jeweilige Pol des Erdäquators eine Kurve um seine mittlere Lage beschreibt. Eine Expedition, die man zur Kontrolle dieser Wahrnehmungen nach Honolulu entsandte, lieferte durch die dort ausgeführten Beobachtungen den Beweis, daß tatsächlich zu der Zeit, wann in Deutschland die geographische Breite für Berlin etwas größer wurde, sie sich dort um den gleichen Betrag verringerte, wie es der Fall sein mußte für zwei Orte, die nahezu um 180 Grad in Länge voneinander abstehen. Die Erkenntnis dieser Tatsache war von hoher astronomischer Bedeutung, wird doch durch den Umstand, daß alle Deklinationsbestimmungen der Gestirne von den Schwankungen der geographischen Breite der Beobachtungsorte abhängig sind, die Kenntnis der Position der Gestirne beeinflußt. Daher war es geboten, diese sogenannten „Polhöhenschwankungen“ fortdauernd zu verfolgen. Auf Veranlassung der internationalen Erdmessung, einer großen Vereinigung von Gelehrten aller Staaten, welche sich die Erforschung der Größe und Gestalt der Erde zur Aufgabe gemacht hat, wurden besondere kleinere Observatorien eingerichtet, die, auf gleicher geographischer Breite gelegen, die Verfolgung der Schwankungen der Erdachse zur Aufgabe erhielten. Solcher Stationen gibt es gegenwärtig auf der nördlichen Halbkugel sechs, welche fast alle genau auf dem 39. Breitengrade gelegen sind; auch auf der südlichen Halbkugel hat man drei solcher Stationen auf dem 32. Grade südl. Br. eingerichtet. Fortlaufende Beobachtungsreihen werden an diesen Stationen mittels gleichgebauter Instrumente mit Hilfe derselben Methode und mit Benutzung der gleichen Sterne ausgeführt. Nur so ist es möglich, ein genaues Bild von dem Verlaufe der Bewegungen der Erdachse um ihre mittlere Lage zu erhalten, und es ist leicht einzusehen, daß solche sorgfältigen Vorkehrungen notwendig sind, wenn man bedenkt, daß die Schwankungen nur wenige Zehntel einer Bogensekunde betragen, also in linearem Maße etwa bis 11 Meter ausmachen. Die mechanischen Ursachen für die Verlagerung der Erdachse sind bis heute noch nicht einwandfrei nachgewiesen. Die Periode der Schwankungen beträgt etwa 430 Tage, aber die Größe der Abweichungen selbst ist fortwährenden Veränderungen unterworfen. Denkt man sich an dem Punkte, welchen die mittlere Lage der Erdachse bezeichnet, eine senkrecht zu ihr liegende Ebene und auf dieser Ebene das Ende der tatsächlichen Drehungsachse eine Kurve beschreibend, so wird man für die letzten 13 Jahre die nebenstehende Darstellung Fig. 4 erhalten, aus der hervorgeht, daß es

Internationaler Breitendienst.

schwer fallen dürfte, einen mathematischen Ausdruck für den Verlauf dieser Schwankungen anzugeben. Tatsächlich haben auch alle Rechnungen, die man ausführte auf Grund der speziell zu solchem Zweck angestellten ausgedehnten Beobachtungsreihen sowie auch derjenigen, die man aus weit zurückliegendem Beobachtungsmaterial der Sternwarten in Greenwich, Pulkowa, Paris, Washington u. a. durch Neuberechnungen abgeleitet hat, zu keinem Resultate in dieser Richtung geführt. Die Versuche, durch Ebbe- und Fluterscheinungen im Inneren der Erde durch Massenveränderungen auf ihrer Oberfläche, etwa durch Abschmelzen der großen Eis- und Schneemassen an den Polen oder durch Hebungen und Senken der Kontinente die Schwankungen der Erdachse zu erklären, sind bisher nicht von Erfolg gewesen.

Ursachen der Polhöhenschwankungen.

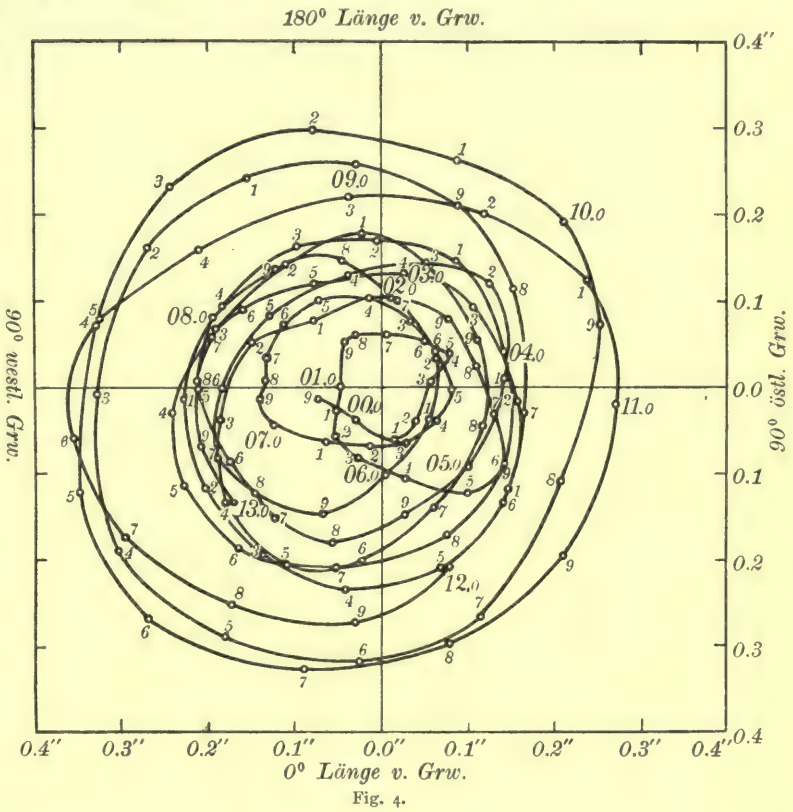


Fig. 4.

Die Erkenntnis der kleinen Veränderungen in der jeweiligen Lage der Umdrehungsachse der Erde ist ermöglicht worden durch die bedeutenden Verbesserungen der astronomischen Instrumente und durch die Vervollkommnung der Beobachtungsmethoden. In gleichem Maße ist damit aber auch die Genauigkeit der Bestimmung der Positionen der Gestirne wesentlich gesteigert worden. Aus diesen Umständen hat nun ihrerseits wieder die Geodäsie Vorteil gezogen, indem die Festlegung einer großen Anzahl fast über die ganze bewohnte Erde verteilter Punkte gegenüber dem Koordinatennetz der Längen und Breiten dadurch sehr erheblich verschärft werden kann.

Haben in früheren Zeiten die Vermessungen der Länder wesentlich politischen und wirtschaftlichen Zwecken gedient, so werden heute die großen Dreiecknetze, die in einem größeren Gebiete die erwähnten Fixpunkte miteinander in Beziehung setzen, d. h. ihre gegenseitige Lage bestimmen, dazu benutzt, die auf geodätischem Wege gefundenen Resultate für lineare Ent-

fernungen und für die Richtungen ihrer Verbindungslinien, mit den aus rein astronomischen Beobachtungen abgeleiteten gleichen Daten zu vergleichen. Die Vergleiche liefern dann durch die Unterschiede, welche sie aufweisen, die Möglichkeit, die Gestalt der Erdoberfläche immer genauer kennen zu lernen. In diesem Sinne stehen die Bestimmungen der Orte der Gestirne in enger Beziehung zu den Aufgaben der Erdmessung, und jedes dieser Wissensgebiete hat besonders in den letzten Dezennien stete Förderung durch das andere erfahren.

Die in die großen Dreiecknetze eingeschalteten engmaschigeren, die die Dreiecknetze II., III. und IV. Ordnung, wie man sie zu benennen pflegt, je nach der mittleren Seitenlänge der sie bildenden Dreiecke, haben dann den weiteren Zweck, für kleinere Gebiete Punkte festzulegen, an die schließlich die Vermessung der land- und forstwirtschaftlich wichtigen Gelände oder die Gestaltung der Stadtgebiete eingeschaltet werden kann.

Geographische Ortsbestimmung in Luftfahrzeugen.

Ein neues Gebiet ist der astronomischen Beobachtungskunst sowie der Technik, welche für diese Beobachtungen die Hilfsmittel liefert, eröffnet worden durch die Anforderungen, die zur Bestimmung der Orte der Luftschiffe durch astronomische Methoden notwendig geworden sind. Ist auch die Aufgabe der Ortsbestimmung in einem das Luftmeer durchfliegenden Luftschiffe oder Freiballon sehr ähnlich derjenigen auf einem Schiffe zur See und können im allgemeinen dieselben Methoden der astronomischen Ortsbestimmung zur Anwendung gelangen, wie sie der Seefahrer seit Jahrhunderten gebraucht, so kommen doch einige Umstände dazu, welche die Anstellung astronomischer Beobachtungen und ihre Auswertung nicht unerheblich erschweren. Einmal ist es der Umstand, daß man vom Ballon aus, wenn er eine erhebliche Höhe über der Erde erlangt hat, die Trennungslinie zwischen Erdoberfläche und Himmelsgewölbe, die Kimm, nur sehr undeutlich und, falls der Ballon sich über Land befindet, gar nicht als Grenze des scheinbaren Horizontes wahrnehmen kann. Durch die Schwierigkeit, welche die Höhenbestimmung des Ballons und die schnelle Veränderlichkeit der Höhe über der Erde bedingen, würde es selbst bei besserer Wahrnehmbarkeit der Kimmlinie schwierig sein, die Höhenmessungen von Gestirnen wegen der Kimmtiefe, die in diesem Falle beträchtlichen Wert erreicht, zu korrigieren; andererseits aber ist die Bewegungsgeschwindigkeit eines Ballons oder gar eines der großen lenkbaren Luftschiffe so bedeutend, daß der Schiffsführer nicht in der Lage ist, umständliche Beobachtungen und längere Rechnungen anzustellen, wenn diese nicht für einen ganz anderen Ort gelten sollen, als für den, an welchem er sich bei Abschluß der Rechnung befindet. Es müssen also sowohl noch die Methoden der Beobachtungen sowie deren Ausrechnung erheblich modifiziert werden. In erster Beziehung ist es notwendig geworden, von der Bezugnahme auf den scheinbaren Horizont Abstand zu nehmen. Man muß deshalb Instrumente verwenden, welche durch eine geeignete Einrichtung, durch eine Libelle oder durch ein Pendel, die angestellten Winkelmessungen auf den wahren Horizont oder auf die Lot-

richtung direkt beziehen. Solcher Instrumente besitzt man mehrere. Der französische Kapitän Fleury hat schon vor langer Zeit einen Sextanten erfunden, bei welchem die Teilung von einer kreisförmigen Glasröhre bedeckt wird, in welcher sich Quecksilber befindet. Nach physikalischen Gesetzen werden beide Enden der Quecksilbersäule stets gleiche Höhe einnehmen. Hat man daher eine Visur nach einem Gestirn ausgeführt, so braucht man nur die freie Zirkulation des Quecksilberfadens zu hemmen, und man wird die Stellung der Enden des Quecksilberfadens auf der Teilung ablesen können. Eine andere Einrichtung an den Sextanten ist von dem Hamburger Ingenieur Reitz angegeben worden und wird neuerdings in mehrfach veränderter Ausführung von mehreren mechanischen Werkstätten, z. B. Butenschön in Hamburg, Spindler und Hoyer in Göttingen u. a., in den Handel gebracht. Bei diesen Instrumenten tritt an die Stelle des Horizontes eine Libelle, bei welcher die Stellung der Blase gleichzeitig mit dem avisierten Gestirn durch Spiegelung im Fernrohr sichtbar gemacht wird. Man sieht also in dem Moment, in welchem die Achse der Libelle horizontal liegt, das Bild des Gestirnes scheinbar über der Mitte der Blase stehen. Diese Instrumente können aber kaum dieselbe Genauigkeit geben wie die am Bord eines Schiffes zur Anwendung gelangenden Sextanten- und Reflexionskreise. Aber es ist auch nicht nötig, daß man den Ort eines Ballons über der Erdoberfläche mit größerer Genauigkeit als auf etwa 5 bis 8 km genau kennt, und das würde einer von den Instrumenten zu fordernden Genauigkeit von 3 bis 5 Bogenminuten entsprechen. Bei einiger Übung gelangt man leicht dahin, mit einem der letztgenannten Instrumente, dem sogenannten Libellenquadranten, eine Genauigkeit in der Höhenmessung von 5 bis 6 Bogenminuten zu erhalten. Die Möglichkeit der Ausführung von Beobachtungen mit genügender Genauigkeit würde damit gegeben sein. Anders steht es mit den Hilfsmitteln zur Auswertung dieser Beobachtungen. Wenn auch von den Fachastronomen die Berechnung einer Zeitbestimmung oder einer Breite aus wenigen Einstellungen eines Gestirnes in ganz kurzer Zeit ausgeführt werden kann, so muß doch bei Luftreisen im allgemeinen damit gerechnet werden, daß astronomisch ausgebildete und in der Rechenarbeit erfahrene Personen sich nicht an Bord befinden, und daß außerdem der Führer eines Luftschiffes seine Aufmerksamkeit vielen anderen Dingen, die für die Sicherheit des Ballons von höchster Bedeutung sind, zuwenden muß, so daß höchstens in den großen lenkbaren Luftschiffen mehrere Personen vorhanden sein können, welche sich in die notwendigen Arbeiten und Pflichten teilen. Aber auch dann ist es notwendig, die rechnerischen Hilfsmittel derart zu vereinfachen, daß sie unter Umständen auch von Laien ausgeführt werden können. Man hat zu diesem Zweck eine Anzahl von Hilfstafeln herausgegeben und Einrichtungen getroffen zur graphischen Auswertung der Beobachtungen, die einen großen Teil der Rechenarbeiten entbehrlich machen, aber immerhin ist auch deren Benutzung von einer gewissen Kenntnis der astronomischen Beobachtungskunst abhängig. Im besonderen sind die graphischen

Hilfsmittel, Sternkarten, Kurventafeln und dergleichen, im schwankenden Ballon nicht immer leicht zu gebrauchen. Die Erfinder und Verfertiger solcher Hilfsmittel haben häufig hübsche theoretische Überlegungen ihren Tafelwerken und ihren Tabellen zugrunde gelegt, die aber wiederum ein nicht unerhebliches mathematisches Verständnis zur schnellen und zweckmäßigen Benutzung erfordern. Da es sich bei Luftfahrten meistens um kleine Zeitabschnitte handelt, selten wird ein Luftschiff 24 Stunden oder länger unterwegs sein, so bietet die Feststellung des Nullmeridians mit der nötigen Schärfe meist keine Schwierigkeiten. Denn ein oder zwei Taschenuhren genügen, um bis auf wenige Sekunden genau für ein oder zwei Tage die Zeit des Nullmeridians zu halten. Die Längenbestimmungen im Ballon würden also nur darauf hinauslaufen, eine Zeitbestimmung für den Moment der Beobachtung zu liefern. Die Beobachtungen eines Gestirnes im Osten oder Westen bei nicht zu geringer Zenitdistanz würden für die Bestimmung der Zeit, also in diesem Falle der Länge, genügen. Ebenso wird eine Höhenbeobachtung in der Nähe des Meridianes für die Bestimmung der Breite ausreichen. Mit besonderem Vorteil hat man deshalb beide Beobachtungssätze wieder zu der Standlinienmethode kombiniert. Ihre Anwendung, welche an Einfachheit und Kürze nichts zu wünschen übrig läßt, wird daher mit oder ohne Benutzung geeigneter Hilfstafeln das gegebene Beobachtungsverfahren für die Ortsbestimmung im Ballon bilden.

Auch andere Vorschläge sind gemacht worden, um eine schnelle Orientierung im Ballon für den Fall, daß von der Oberfläche der Erde nichts sichtbar ist oder der Ballon sich über dem Meere befindet, zu ermöglichen, u. a. der, daß man mit Hilfe der Abweichung der Magnetnadel und aus der Intensität der magnetischen Kraft mit Hilfe der für die Erdoberfläche an den verschiedenen Orten bekannten Größen dieser Elemente eine Ortsbestimmung erhält. Denkt man sich z. B. für Europa die Linien gleicher magnetischer Deklination und diejenigen gleicher Intensität auf einer Karte eingetragen, so werden sich diese Linien unter günstigen Winkeln schneiden. Hat man nun im Ballon die Möglichkeit, ebenfalls die magnetische Deklination und deren Intensität auf einfache Weise zu bestimmen, so würde durch das Aufsuchen desjenigen Punktes auf der Erdoberfläche, welcher den gefundenen Werten beider magnetischer Elemente entspricht, die Orientierung für die Fahrt des Ballons gegeben sein. Dabei ist allerdings nicht in Betracht gezogen, daß wohl nicht in allen Punkten der Senkrechten über einem Ort der Erde dieselben magnetischen Verhältnisse wie auf der Oberfläche der Erde bestehen. Es ist vielmehr sicher, daß das letztere nicht der Fall ist. Man muß also von dieser Art der Orientierung zunächst wohl absehen, und sie wird erst eine Bedeutung erlangen können, wenn wir durch ausgedehnte Beobachtungsreihen das Verhalten der erdmagnetischen Verhältnisse in den der Erde zunächstliegenden Schichten des Luftmeeres bis auf einige tausend Meter über dem Erdboden erforscht haben werden.

Literatur.

S. 142. Die hier auszugsweise gegebenen Daten über frühere Bestimmungen sind entnommen aus R. WOLF, Handbuch der Astronomie (Zürich, 1892) Bd. I § 191, Bd. II § 375. Diese Angaben stützen sich auf die Zahlen in: J. C. HOUZEAU, Vade-Mecum de L'Astronome (Bruxelles, 1882), wo sich ein sehr ausführliches Verzeichnis der bekannten Bestimmungen der Schiefe der Ekliptik findet, S. 189 ff. WOLF leitet aus dem dort gegebenen Zahlenmaterial für die Schiefe der Ekliptik die folgende Formel ab:

$$\epsilon = 23^0 28' 14.6'' - 0.46708\, t + 0.000022528\, t^2,$$

wo t vom Jahre 1800.0 an gezählt ist.

S. 144. Über die Einführung der Koordinatensysteme und ihre Beziehungen zu Raum und Zeit, wenn diese Bezugnahme heute dadurch noch allgemein genug ausgedrückt ist, findet man ausführliche, spekulative wie auch theoretische und praktische Auseinandersetzungen in: Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften (Leipzig), Bd. VI 2. Teil Kap. 1 (Über Koordinaten und Zeit, von C. ANDING).

S. 148. Das erste Sternverzeichnis von Hipparch findet sich im Almagest des PTOLEMÄUS; eine gute deutsche Ausgabe ist neuerdings von KARL MANITIUS bei B. G. Teubner erschienen. Bisher gab es außer griechischen und lateinischen Ausgaben (zum Teil sehr schöne Drucke von 1538 und aus der Mitte des 16. Jahrhunderts) nur diejenige von dem Franzosen HALMA in den Jahren 1813—16 zu Paris edierte. Einzelne Teile des Almagest sind auch anderwärts erschienen, z. B. der Sternkatalog, das 7. und 8. Buch, 1712 zu Oxford. Eine griechische Ausgabe neuen Datums erschien ebenfalls bei B. G. Teubner, besorgt von J. L. HEIBERG (Kopenhagen). Eine fast vollständige Zusammenstellung aller bis zum Jahre 1875 erschienenen Sternverzeichnisse mit genauer Inhaltsangabe und kritischen Bemerkungen hat KNOBEL in Mém. of the Roy. Astr. Society im Jahre 1877 Vol. XLIII mitgeteilt. Später hat FR. RISTENPART in Valentiners Handwörterbuch der Astronomie eine Liste von 336 Sternkatalogen gegeben. Als Sonderabdruck erschienen in Breslau 1901. Dieses Verzeichnis enthält die Aufzählung der für Forschungen über Eigenbewegungen usw. besonders wichtigen Sternkataloge mit Angaben über Anzahl, Helligkeit der katalogisierten Sterne sowie über die beabsichtigte Genauigkeit und die Gebiete des Himmels, die der Katalog umfaßt.

S. 156. Die Anzahl der Werke über die von den Seefahrern, Astronomen und Geodäten im Laufe der Zeit benutzten Instrumente ist naturgemäß sehr groß. Die Instrumente vor Erfindung des Spiegelsextanten behandelt A. BREUSING, Die Nautischen Instrumente bis zur Erfindung des Spiegelsextanten (Bremen, 1890). Die ersten Mitteilungen über diesen nebst Abbildungen finden sich in Phil. Transactions (London, 1731 und 1732). Die späteren größeren und genauere Resultate ergebenden Instrumente finden sich an der Hand vieler Abbildungen kurz beschrieben in JOH. A. REPSOLD, Geschichte der astronomischen Meßwerkzeuge von Purbach bis Reichenbach 1450 bis 1830 (Leipzig, 1908) und nach Theorie und Gebrauch zusammengestellt in L. AMBRONN, Handbuch der astronomischen Instrumentenkunde (Berlin, 1899) mit vielen Literaturangaben, auf die auch hier bezüglich aller Einzelheiten hingewiesen werden muß. Bezüglich historischer Angaben finden sich auch viele Hinweise in R. WOLF, Handbuch der Astronomie — s. oben.

S. 160. REGIOMONTAN ließ 1475 einen Kalender für die Jahre 1475—1513 erscheinen, der auf dem Schlußblatte gezeichnet ist: „Also ist begriffen körczlich diss kalenders nucz

und töglichkeit nach meinem slechten tewtsche und chleinem vermögen. M. Johan von Köngsperg", und in der lateinischen Ausgabe trägt sie die Schlußsignatur: „Ductu Joannis de Monteregio". — Gegenwärtig befinden sich im Gebrauch: Connaissance des Temps, ou des Mouvements Célestes, pour le Méridien de Paris à l'usage des Astronomes et des Navi gateurs, pour l'an .... publiée par le Bureau des Longitudes (Paris); The Nautical Almanac and Astronomical Ephemeris for the Year ....., for the Meridian of the Royal Observatory at Greenwich, published by Order of the lords Commissioners of the Admiralty. The American ephemeris (Washington); Berliner Astronomisches Jahrbuch (Berlin) und einige andere. Für speziell nautische Zwecke: Nautisches Jahrbuch oder Ephemeriden und Tafeln (Berlin), herausgegeben vom Reichsamt des Innern; Astronomisch-Nautische Ephemeriden (Triest). Jahrbücher allgemeinen Inhalts: Annuaires du Bureau des longitudes (Paris); Annuaire de l'Observatoire de Bruxelles (Bruxelles). Außerdem gibt es noch eine erhebliche Anzahl weniger wichtiger, nur selten gebrauchter Jahrbücher.

S. 160. Die Bewegung des Mondes ist bei allen Völkern, die sich mit der Betrachtung der Himmelserscheinungen befaßten, von allem Anfang an aufmerksam verfolgt worden. Die ersten Angaben beziehen sich auf die Lichtgestalten und die Finsternisse und hatten als Resultat die Erkenntnis der SAROS-Periode sehr nahe, $6585\frac{1}{3}$ Tage, nach welcher sich die Stellungen des Mondes zur Sonne wiederholen. — Die älteren Werke übergehend, mögen hier nur angeführt werden: P. S. DE LAPLACE, Mémoire sur la théorie de la Lune, Mem. III 198 (Paris, 1801); J. PLANA, Théorie du mouvement de la Lune (Turin, 1832); C. DELAUNAY, Théorie du mouvement de la Lune (Paris, 1860—1867); P. A. HANSEN, Darlegung der theoretischen Berechnung der in den Mondtafeln angewandten Störungen (Leipzig, 1863), Abh. VI 93, (1864) VII 1; S. NEWCOMB, Researches on the Motion of the Moon (Washington Observations, for 1875 — Washington, 1878); H. BATTERMANN, Bestimmung der Mondlänge, des Mondhalbmessers und der Sonnenparallaxe, Beobachtungsergebnisse der Kgl. Sternwarte zu Berlin Nr. 11 (Berlin, 1902).

S. 166. Betreffs der Methoden zur Bestimmung der Mondorte geben die Handbücher der sphärischen Astronomie in den betreffenden Kapiteln den nötigen Aufschluß. Es wären in dieser Richtung sowohl als auch betreffs der Bestimmung der Koordinaten der übrigen Gestirne anzuführen: F. BRÜNNOW, Sphärische Astronomie (Berlin); E. CASPARI, Cours d'astronomie pratique (Paris); W. CHAUVENET, Manual of spherical and practical Astronomie (Philadelphia); L. DE BALL, Lehrbuch der sphärischen Astronomie (Leipzig, 1912). Für die Ortsbestimmung auf der Erde würden hier zu nennen sein die Handbücher und Tafelsammlungen zur geographischen Ortsbestimmung: WISLICENUS, Handbuch der geographischen Ortsbestimmungen auf Reisen (Leipzig); AD. MARCUSE, Handbuch der geographischen Ortsbestimmung für Geographen und Forschungsreisende (Braunschweig); P. GÜSSFELDT, Grundzüge der astronomisch-geographischen Ortsbestimmung (Braunschweig); TH. ALBRECHT, Formeln und Hilfstafeln für geographische Ortsbestimmungen (Leipzig); AMBRONN und DOMKE, Astronomisch-geodätische Hilfstafeln (Berlin, 1909).

S. 167. Für die Ortsbestimmung zur See kommen heutigentages in Betracht: BOLTE, Neues Handbuch der Schiffahrtskunde (Hamburg); BREUSING, Steuermannskunst (neu herausgegeben von SCHILLING); beide mit Tafelwerken versehen; Lehrbuch der Navigation, herausgegeben vom Reichsmarineamt.

S. 170. Die grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiete der Verfolgung der Bewegungen der Erdachse sind: KÜSTNER, Neue Methode zur Bestimmung der Aberrationskonstante nebst Untersuchungen über die Veränderlichkeit der Polhöhe (Berlin) und die einschlägigen Publikationen des Bureaus der Internationalen Erdmessung, herausgegeben vom Zentral-Bureau Potsdam. Die betr. Bearbeitungen in diesen Publikationen sind zum weitaus größten Teile angestellt von Geheimrat TH. ALBRECHT, Abteilungsvorsteher am Kgl. Preußischen Geodätischen Institut, welcher auch in entsprechenden Zeitabschnitten Auszüge aus diesen Arbeiten in den Astronomischen Nachrichten erscheinen läßt. Den letzten Aufsätzen dieser Art ist auch die beigegebene Darstellung Fig. 4 entnommen.

ERWEITERUNG DES RAUMBEGRIFFES.

Von

A. v. Flotow.

I. Allmähliche Entwicklung einer Raumvorstellung im Weltall. Alle menschliche Erkenntnis fängt mit dem Augenschein an, und so ist auch das ganze Weltbild in den früheren Kulturstufen der Menschheit auf den bloßen Schein gegründet. Die Erde, der Wohnplatz des Menschen, ist für ihn der Inbegriff der Welt. Er durchstreift sie nach allen Himmelsrichtungen, aber wohin er sich auch wendet, so weit das Auge reicht, nirgends läßt sich ein Ende absehen. Über diese Welt spannt sich der Himmel in Gestalt einer flachen Kugelschale aus, in deren Mittelpunkt der Mensch selbst zu stehen scheint. Es ist die Sphäre, an der sich die himmlischen Vorgänge scheinbar abspielen, und dieses Himmelsbild bleibt allem Anscheine nach ein Bild, eine flächenhafte Erscheinung, für die uns jede Tiefenempfindung abgeht, ein Bild, das uns unnahbar vor Augen steht, weil eben alle himmlischen Vorgänge in unerreichbarer Ferne vor sich gehen. Hier haben wir keine Möglichkeit, die einzelnen Erscheinungen durch Nähertreten, durch Betrachten von verschiedenen Seiten, wie man es bei eingehender Besichtigung eines irdischen Objektes gewohnt ist, näher kennen zu lernen, und das ist es, was das Kennenlernen des Universums so erschwert. Das Himmelsbild eine Welt des Scheins.

So ist es nur ganz natürlich, daß man die Vorgänge im Weltall zunächst so zu deuten suchte, wie sie sich dem Menschen von seinem subjektiven Standpunkte aus darstellen. Man vermochte nur die Richtungen nach den Gestirnen und ihre gegenseitigen Veränderungen im Laufe der Zeit in den Bereich der Untersuchungen zu ziehen, aber über Entfernung und Größe der Gestirne konnte man keinen Aufschluß erhalten. Es fehlte noch das Verständnis für die Vorstellung einer räumlichen Ausdehnung in dieser weit außerhalb der Erde gelegenen Erscheinungswelt. Wohl hatte man aus aufmerksamen Beobachtungen von Finsternissen und Sternbedeckungen auf eine Verschiedenheit in den Entfernungen der Sonne und des Mondes von der Erde geschlossen, aber man erging sich hierbei nur in Mutmaßungen, in rohen Schätzungen, die einer sicheren Grundlage entbehrten, geschweige denn, daß von einer Bestimmung dieser Entfernungen, von einer Vergleichung derselben mit bekannten irdischen Längen die Rede sein konnte. Der weite leere Raum, der sich zwischen jener fernen Welt und der irdischen ausdehnte, schien jedes Eindringen in jene Welt auszuschließen.

Die Welt des Seins.

Das Altertum hat im wesentlichen nur Sphärik getrieben. Man untersuchte nur die Richtungen, in denen uns die Gestirne erscheinen, nicht ihre Entfernungen von der Erde; man beschäftigte sich, um eine moderne Ausdrucksweise zu gebrauchen, mit den im vorigen Abschnitt eingehend besprochenen Polarkoordinaten ohne Rücksicht auf den Radiusvektor. Man erfand zur Erklärung des scheinbaren Verlaufes der Planetenbewegungen, wie er sich für einen Beobachter auf der Erde in ziemlich verwickelter Weise darstellt, einen sinnreichen Apparat, den wir in der Epizykelntheorie des Ptolemäus vollständig ausgearbeitet finden. Es gibt wohl kein wissenschaftliches Werk des Altertums, das zu einer solchen Bedeutung gelangt ist, wie die μεγάλη σύνταξις oder, wie der arabische Titel kurz lautet: Almagest des Claudius Ptolemäus, ein Werk, das gegen 160 n. Chr. vollendet wurde und uns in unversehrtem Zustande erhalten geblieben ist. In diesem Werke ist das ganze astronomische Wissen der damaligen Zeit niedergelegt. Anderthalb Jahrtausende blieb es die unerschöpfliche Quelle, auf die bei allen astronomischen Fragen zurückgegangen wurde, bis des Nikolaus Kopernikus Werk De revolutionibus orbium coelestium libri VI (Nürnberg 1543) der astronomischen Anschauung eine neue Richtung wies. Kopernikus ging von dem Bestreben aus, alle bekannten Erscheinungen auf eine möglichst einfache Weise zu erklären, und das gelang ihm in der Tat, indem er den subjektiven Standpunkt verließ oder, wie wir jetzt sagen können, indem er eine andere Wahl des Koordinatenanfanges traf. An Stelle der von Ptolemäus betrachteten geozentrischen Bewegung führte er die heliozentrische ein. Aber man darf dies nicht so auffassen, als ob jetzt durch das Theorem des Kopernikus das Lehrgebäude des Ptolemäus ins Schwanken geraten wäre; es blieb nach wie vor mit derselben Berechtigung bestehen. Man hatte jetzt eben nur die Vorgänge am Himmel von einem anderen Standpunkte aus der Betrachtung unterworfen. Wenn man näher zusieht, so erkennt man, daß die von Apollonius erfundenen und von Ptolemäus übernommenen Epizykeln ihrer Natur nach nichts anderes sind als ein gewisser geometrischer Rechnungsmodus, auf den im Grunde genommen auch unsere modernen analytischen Entwicklungen hinauslaufen. Wollen wir nämlich von der heliozentrischen Bewegung eines Planeten auf seine geozentrische Bewegung übergehen, so gelangen wir dazu, indem wir von ersterer die heliozentrische Bewegung der Erde geometrisch, d. h. in bezug auf Größe und Richtung, in Abzug bringen. Dies führt uns aber, wenn wir konstruktiv vorgehen, zum Epizykel.

Die räumliche Ausdehnung und die Gesetze in der Welt des Seins.

Durch Kopernikus war der erste Schritt zu einer räumlichen Auffassung des Universums getan. Man betrachtete nicht mehr das Himmelsbild als Projektion auf die Sphäre, sondern verlegte im Geiste seinen Standpunkt in die Sonne; man änderte seine Stellung im Raume und gelangte so zu einer einfachen Anschauung der Vorgänge in unserm Planetensystem. Im Mittelpunkt der Bewegung steht die Sonne, um sie bewegen sich die Planeten. Aber die Ausdehnungen in diesem Gebiete, die Entfernungen der

Planeten von der Sonne zu bestimmen, das lag noch nicht im Bereiche der Möglichkeit, dazu bedurfte es noch der Vervollkommnung der Beobachtungsinstrumente und Beobachtungsmethoden einerseits und der Kenntnis der Gesetze, nach denen die Bewegungen im Planetensystem vor sich gehen, andererseits.

Das Theorem des Kopernikus erhielt erst durch die Arbeiten Joh. Keplers ein scharfes Gepräge. Bereits Kopernikus war es nicht verborgen geblieben, daß seine Annahme konzentrischer Kreisbahnen nur eine Annäherung war, und er mußte, um die noch recht bemerkbaren Abweichungen zu erklären, zu exzentrischen Kreisen seine Zuflucht nehmen; auch konnte er der Epizykeln nicht gänzlich entbehren. Der bedeutungsvolle Schritt Keplers bestand darin, daß er von der Kreislinie, die man seit alters her als die vollkommenste und daher auch als die den Naturerscheinungen allein zukommende ansah, abging. Durch mühselige Versuche und Rechnungen, zum nicht geringen Teil auch untermischt mit phantastischen Spekulationen, gelangte er zu den nach ihm benannten Gesetzen der elliptischen Bewegung der Planeten, die er in seinen beiden Werken: Astronomia nova seu de motibus stellae Martis (Pragae 1609) und Harmonices mundi libri V (Lincii Austriae 1619) veröffentlichte. Es muß als ein glücklicher Umstand angesehen werden, daß Kepler einerseits die reichhaltigen und mit großer Sorgfalt von Tycho Brahe auf der Insel Hven in Dänemark in den beiden letzten Dezennien des 16. Jahrhunderts angestellten Beobachtungen als Hinterlassenschaft zufielen, und daß er andererseits zu seinen Untersuchungen gerade die Beobachtungen des Mars, dessen Exzentrizität selbst bei der damaligen Genauigkeit der Beobachtungen nicht unbemerkt bleiben konnte, heranzog. In seiner Astronomia nova stellt er zwei Gesetze auf, durch die Bahnform und Geschwindigkeit in der Bahn für jeden einzelnen Planeten bestimmt werden. Aber in der richtigen Erkenntnis, daß in der Natur alles mit allem in Beziehung steht, ahnte er noch die Existenz eines allgemeineren Gesetzes, eines inneren Zusammenhanges zwischen allen Planetenbewegungen, und diese Ahnung sollte er auch endlich bestätigt finden, wenn auch erst nach langen Mühsalen. Nach Art der Pythagoreer suchte er nach den harmonischen Verhältnissen, die dem gesetzmäßigen Aufbau in der Natur zugrunde liegen sollten, und versuchte seine Kombinationen ebenso auf die Distanzen der Planeten anzuwenden. Der Phantasie waren hier keine Schranken gesetzt, und es dürfen uns z. B. seine Versuche, die Verhältnisse der Längen der Saiten, die den Intervallen in der Tonlehre entsprechen, oder gar die platonischen Körper, Würfel, Tetraeder usf., mit diesen Distanzen in Beziehung zu setzen, nicht verwundern. So ist es auch einer bloßen Mutmaßung eines Zusammenhanges zwischen den Umlaufszeiten und den Distanzen der Planeten, einer Mutmaßung, die allerdings mit natürlicher Berechtigung bereits den Anschauungen der Alten über die Anordnung des Weltsystems zugrunde liegt, zu verdanken, daß Kepler die verschiedenen Potenzen der einen der Reihe nach mit denen der anderen verglich; und diese Versuche sollten von Erfolg gekrönt sein. Am 15. Mai 1618 fand er, wie er

uns in Harmonices mundi verheißungsvoll mitteilt, das Gesetz, daß sich die Quadrate der siderischen Umlaufszeiten irgend zweier Planeten wie die dritten Potenzen der großen Achsen ihrer Bahnen verhalten.

Diese Wechselbeziehung zwischen zwei Bahnelementen erlangt besonders dadurch eine große Bedeutung, daß sich das eine Element, die Umlaufszeit, leicht und mit großer Genauigkeit bestimmen läßt, während dies für das andere Element, die große Achse, keineswegs gilt. Die Kenntnis der Umlaufszeiten führt durch das dritte Keplersche Gesetz ohne weiteres zur Kenntnis des Verhältnisses der großen Achsen zueinander. Man kann also eine von ihnen zur Längeneinheit wählen und erhält dann die übrigen in dieser Längeneinheit ausgedrückt. Will man aber diese Längeneinheit mit unserer bekannten irdischen Längeneinheit in Beziehung setzen, so muß man eine Vergleichung beider vornehmen können; man muß in der Lage sein, wenigstens für einen Planeten die große Achse seiner Bahn bestimmen zu können, und hierzu ist es auf Grund der Keplerschen Entdeckung nur nötig, daß man zu irgendeiner Zeit die Entfernung eines Planeten von der Erde oder seine Parallaxe bestimmen kann.

Der ursächliche Zusammenhang.

Daß die Gesetze, nach denen sich die Planeten um die Sonne und allgemein die Satelliten um ihren Zentralkörper bewegen, nur der Ausfluß eines allgemeineren Prinzips sind, mochte man wohl hier und da ahnen. Eine positive Form nahm dieser Gedanke aber erst an, als Newton die Frage aufwarf, ob nicht etwa dieselbe Kraft, die die Bewegung eines fallenden Körpers auf der Erde verursache, auch auf weitere Entfernungen im Raume wirke und so in gleicher Weise veranlasse, daß der Mond in seiner Bahn um die Erde gehalten würde. Newton nahm 1666 seine Untersuchungen auf, ließ sie aber, gewissenhaft, wie er war, zunächst wieder liegen, da der von ihm berechnete Wert der Schwerebeschleunigung nicht mit dem von Galilei aus direkten Messungen hervorgegangenen Werte übereinstimmte. Der Grund dieser Mißstimmigkeit lag aber nicht in einer Unrichtigkeit des mathematischen Ansatzes, sondern in der damals noch recht ungenauen Kenntnis der Erddimensionen. Als ihm 16 Jahre später die Resultate der Picardschen Gradmessung bekannt wurden und er sah, daß er mit einem viel zu kleinen Werte eines Äquatorgrades gerechnet hatte, wiederholte er seine Rechnungen und fand nun eine vollständige Übereinstimmung mit Galileis Messungsergebnissen. Das von ihm vermutete Prinzip der allgemeinen Gravitation war hiermit als richtig erwiesen und gab Anlaß zur Herausgabe seines fundamentalen Werkes: Philosophiae naturalis principia mathematica, Londini 1687, das den Beginn einer neuen Epoche in der Geschichte der Astronomie bezeichnet; bildet es doch die Grundlage zu einem neuen Zweige des astronomischen Lehrgebäudes, der Mechanik des Himmels oder, wie man auch früher sagte, der physischen Astronomie.

Reminiszenz.

Die geistige Entwicklung, die das ganze Menschengeschlecht im Laufe der Jahrtausende durchmacht, findet ein getreues Abbild in der geistigen Entwicklung des einzelnen Menschen. Die ersten Anschauungen in der Natur

gründen sich nur auf den Schein. Man erkennt wohl die Wiederkehr gewisser hervortretender Erscheinungen, im allgemeinen erscheint aber das von der Außenwelt entworfene Bild regellos und ohne Gesetz. Mit zunehmender Erfahrung sondern sich aus der Gesamtheit der Erscheinungen Gruppen ab, die verwandte Eigenschaften zeigen, für die man Erklärungen sucht. Aber solange der Standpunkt noch ein rein subjektiver ist, werden wir über den wahren Verlauf aller Vorgänge getäuscht, wir sehen nur ihr projiziertes Bild. Erst mit Verlassen des subjektiven Standpunktes ist es möglich, eine der Wahrheit entsprechende Deutung zu geben und damit den Weg zu weiterer Erkenntnis anzubahnen, deren letztes Ziel die Ergründung der allen Erscheinungen zugrunde liegenden Ursachen ist.

Wir erleben in uns diesen geistigen Prozeß, nur mit dem Unterschiede, daß wir Erfahrung und Erkenntnis unserer Vorfahren als etwas Fertiges hinnehmen, daß wir nicht mehr die mühseligen Wege und Verirrungen, die dazu führten, zu durchlaufen brauchen. Wenn man noch hier und da auf eine geringschätzige Meinung über die Vorstellungen, die sich die Gelehrten des Altertums und Mittelalters von der Erde und dem Weltall bildeten, stößt, so zeugt dies von einer falschen Beurteilung ihrer Leistungen. Man vergißt eben nur zu leicht, auf den subjektiven Standpunkt Rücksicht zu nehmen. Gebunden an die Scholle, die wir bewohnen, beurteilen wir alles so, wie es uns von ihr aus erscheint, wir betrachten alle Erscheinungen relativ zu unserem Standpunkt. Wollen wir uns aber hiervon freimachen, so müssen wir diesen Standpunkt seiner Lage nach kennen lernen, und dies führt zu den beiden Aufgaben, diesen Standpunkt auf der Erde selbst und sodann die Lage der Erde im Raume für jeden Augenblick unzweideutig anzugeben. Dieses Kennenlernen aber ist es, das durch die besonderen Umstände sehr erschwert ist. Könnten wir uns weit genug von der Erde entfernen, so würde es uns nicht schwer werden, etwas über die Gestalt und Bewegung der Erde auszusagen. Wir würden erkennen, daß die Erde die ungefähre Gestalt einer Kugel hat, daß die Unebenheiten ihrer Oberfläche, die auf uns als Berge und Täler oft einen ganz gewaltigen Eindruck machen, im Vergleich zur Größe der Erde ganz verschwindend wirken, daß sie rotiert und sich dabei um die Sonne bewegt. Aber es ist uns, da wir uns von der Erde nicht freimachen können, versagt, diese Tatsachen direkt festzustellen; wir können sie nur aus den veränderlichen Vorgängen in der Außenwelt schließen. Durch die Beobachtung der Gestirne wird erst die Bestimmung der Gestalt und der Größe der Erde ermöglicht.

Die ältesten Anschauungen.

II. Entwicklung der Vorstellungen von der Gestalt und Größe der Erde. Die ältesten Völker hatten von der Gestalt der Erde höchst mannigfache und phantastische Gedanken; ja es handelt sich oft weniger um direkte Vorstellungen als vielmehr um einen Ausdruck für etwas Unerfaßbares. Die Erde, d. i. zunächst nur das übersehbare Stück Land, ist nach den Anschauungen im Alten Testament eine begrenzte Scheibe, gegründet auf Grundfesten. Hiermit begnügt man sich, das bloße Wort muß einen Be-

griff ersetzen. Man fragt sich nicht weiter, wo diese Grundfesten nun wieder aufruhen, welches schließlich die letzte aller Stützen ist. Vielleicht hat man sich sogar unter den sogenannten Angeln der Erde überhaupt keine Stützpunkte auf einer festen Basis zu denken, sondern nur in sinnbildlicher Weise vom göttlichen Willen unwiderruflich festgesetzte Punkte, von denen sich die Erde nach keiner Richtung hin entfernen kann, ausgenommen, wenn Jahwe selbst sie erschüttert, was sich dann durch Erdbeben zu erkennen gibt. Diese Anschauung der Erde als eine flache endliche Scheibe, auf die sich der Himmelsdom aufstützt, die also mit dem Weltall in physischem Zusammenhange steht, finden wir auch bei Homer und fast bei allen alten Dichtern vertreten. Der Okeanos umfließt diese Scheibe; er bildet den äußeren Abschluß der Erde und damit auch den Abschluß weiterer Vorstellungen. Aus ihm erheben sich die Gestirne, um ihren täglichen Lauf zu beginnen, in ihn sinken sie wieder zurück, nachdem sie ihren Lauf vollendet haben. Daß man die Gestirne bei ihrem Auf- und Untergange in Berührung mit der Erdgrenze annahm, geht aus der Meinung über die Äthiopier, die entlegensten Völker, die man damals kannte, hervor. Da man sie sich nahe an den Grenzen der Erdscheibe wohnend dachte, so glaubte man, sie hätten durch die größere Nähe der auf- und untergehenden Sonne ihre dunkle Hautfarbe erhalten. Man kannte zunächst nur die Länder um das Mittelländische Meer. Erst durch Alexanders des Großen Züge wurde der Orient mehr bekannt. Die weitere Entwicklung von Handel und Verkehr, die zu größeren Reisen Anlaß gab, hatte zu der Ansicht geführt, daß die Erde eine unermeßliche Ebene sei. Erst die vergleichende Beobachtung der Gestirne konnte richtigere Vorstellungen von der Gestalt und Größe der Erde herbeiführen, die unbedingt den ersten Schritt zur Erkenntnis der räumlichen Anordnung des Weltalls bilden mußten.

Ein Umstand machte den alten griechischen Philosophen bei ihren Erklärungsversuchen besondere Schwierigkeit; es war die sogenannte Ruhe der Erde. Die Erde, das Symbol der Festigkeit, konnte man sich nicht anders denken als auf Stützpunkten ruhend. Man hatte noch keine Ahnung, daß alle Bewegungsvorgänge im Weltenraume eben nur relativ sind. Befindet sich ein Fahrzeug in voller Fahrt, so ist es im Vergleich zu uns, wenn wir uns auf ihm befinden, in scheinbarer Ruhe, wenn wir uns aber außerhalb befinden, in Bewegung. Bei Thales finden wir die Ansicht vertreten, daß die Erde auf Wasser ruhe; als einen Beweis hierfür hielt er die aus der Erde hervorquellenden Wasser. Wenn man sich nun aber die Erde als eine unendliche Ebene, die auf festen Stützen aufruht, dachte, wo blieben dann eigentlich die Sonne, der Mond und die Gestirne von ihrem Untergang bis zu ihrem Aufgang? Hier geht Anaximander, der Nachfolger des Thales, einen Schritt weiter. Indem er diese Frage zu beantworten sucht, kommt er zu der Schlußfolgerung, daß die Erde jedenfalls keine unendliche Ausdehnung besitzen könne, daß sie vielmehr ein ringsum abgeschlossener Körper, der frei inmitten der Himmelskugel schwebt, sein müsse. An sich erscheint dieser Gedanke recht einfach, doch stellt er einen ganz bedeuten-

den Fortschritt dar. Fragt man nun, wie sich eigentlich Anaximander das freie Schweben des Erdkörpers vorstellt, so zeigt es sich, daß in seiner Beweisführung ein Grundsatz der Newtonschen Mechanik verborgen liegt, nämlich daß gleichgroße, aber entgegengesetzt gerichtete Kräfte einander aufheben. Er drückt sich, wie uns Aristoteles erzählt, etwa so aus: Wenn ein Körper in der Mitte der Himmelskugel frei schwebt, so sind nach allen Richtungen hin die gleichen Umstände vorhanden, und es ist daher nicht einzusehen, daß sich der Körper nach der einen oder anderen Richtung hin bewegen solle. Da Anaximander noch an der Anschauung einer ebenen Oberfläche festhielt, so erscheint seine Vorstellung von der Erde als eine kurze runde Säule, deren Höhe zum Durchmesser sich ungefähr wie 1 : 3 verhält, als ein auf Beobachtungen basierender Schluß, nicht als bloßes Phantasiebild oder als eine philosophische Demonstration, wie wir es z. B. bei Plato finden. Wenn Plato die Erde mit einem Würfel vergleicht, so ist seine Schlußfolgerung etwa folgende: Unter den vier Elementen ist die Erde das festeste; unter allen Körpern kommt aber dem Würfel, da er die sicherste Grundfläche hat, diese Eigenschaft zu; daher muß die Erde auch die Gestalt eines Würfels haben.

Vorstellung der Erde als Kugel.

Unter den verschiedenen Ansichten, die man hinsichtlich der Form der freischwebenden Erde besaß, mag wohl in dieser Zeit die der Kugelform hier und da aufgetaucht sein; sicher ist jedenfalls, daß die Pythagoreer die Lehre von der Kugelgestalt verbreiteten. Man wird wohl nicht fehlgehen, wenn man Parmenides als ersten, der die Kugelgestalt lehrte, ansieht, wird doch ihm auch die Einteilung der Erde in fünf Zonen zugeschrieben. Klar ausgesprochen finden wir aber diese Vorstellung erst bei Aristoteles, der die bisher herrschenden Ansichten kritisch zusammenstellte und die Kugelgestalt als notwendige Folge der Schwere darzustellen sucht. Hier finden wir bereits deutlich die Idee der Attraktion nach einem Massenzentrum ausgesprochen. Jedes Teilchen, so drückt er sich etwa aus, ist schwer und sinkt nach dem Mittelpunkt zu, wobei es von den folgenden Teilchen immer mehr zusammengedrückt wird. Da dies nun offenbar von allen Seiten in gleicher Weise geschieht, — denn warum sollte eine Richtung vor den andern ausgezeichnet sein? — so müssen sich die Teilchen konzentrisch um den Mittelpunkt anordnen. Durch ähnliche, wenn man so will, theoretische Schlüsse, die den inneren physischen Zusammenhang ahnen lassen, sucht auch Archimedes die Notwendigkeit der Kugelgestalt der Erde aus der Eigenschaft der Flüssigkeiten zu folgern. Er stellt den Satz auf, daß die Oberfläche einer jeden zusammenhängenden Flüssigkeit im Zustande der Ruhe sphärisch ist, und daß der Krümmungsmittelpunkt dieser sphärischen Fläche mit dem Erdmittelpunkte zusammenfällt. Außer diesem Versuche, die Theorie zum Beweise heranzuziehen, finden wir bei Aristoteles noch verschiedene Gründe der Erfahrung angeführt. Der Schatten der Erde auf dem Monde bei Mondfinsternissen ist immer kreisrund. Dieser Satz gilt aber nicht für die Kugel allein, es fehlt hier noch das Moment der Achsendrehung. Erst wenn man

nachweisen kann, daß der Schatten für alle möglichen Lagen des schattenwerfenden Körpers ein Kreis bleibt, ist man berechtigt, auf eine Kugel zu schließen. Der zweite empirische Beweis bezieht sich auf die veränderte Stellung der Sterne, wenn man sich in der Nordsüdrichtung bewegt. Neue Sterne erheben sich über den Horizont, oder bisher sichtbare werden nicht mehr gesehen; Sterne, die ursprünglich das Zenit passierten, tun dies nicht mehr. So werden z. B. in Ägypten Sterne gesehen, die man in nördlicher gelegenen Gegenden nicht mehr sieht. Da sich diese Erscheinung schon bei kleineren Reisen zeigt, so schließt Aristoteles daraus, daß die Erde nicht sehr groß sein könne, und gibt an, daß die Mathematiker den Umfang zu 40 Myriaden Stadien annehmen. Wieweit sich diese Annahme der Wahrheit nähert, läßt sich nicht entscheiden, da uns die Länge des Stadiums unbekannt st.

Die beiden Erfahrungsgrundsätze, die für die Kugelhypothese von Bedeutung sind.

Unter den verschiedenen Gründen der Erfahrung, die für den Beweis der Kugelgestalt der Erde noch heute im Unterrichte angegeben zu werden pflegen, sind es eigentlich nur zwei, die in ihrer geometrischen Form allein als stichhaltig erscheinen. Der eine ist die stetige Veränderlichkeit der Kulminationshöhe eines Gestirns, wenn man in der Richtung einer Mittagslinie, der andere ist die stetige Verfrühung bzw. Verspätung des Auf- oder Unterganges eines Gestirns, wenn man in der Richtung eines Parallelkreises fortschreitet. Den ersten Grund fanden wir bereits direkt bei Aristoteles ausgesprochen; ob er sich auch des zweiten als Erfahrungstatsache bewußt war, oder ob er ihn nur vermutete, da er von der Möglichkeit eines Zusammenhanges zwischen dem atlantischen und dem indischen Meere spricht, läßt sich nicht entscheiden. Auch bei Kleomedes, dem Vertreter der stoischen Schule, finden wir diese Gründe angeführt, um die Kugelgestalt der Erde als die allein zulässige unter allen andern Formen nachzuweisen. Wir wissen nicht, ob Kleomedes noch vor Ptolemäus oder erst nach ihm lebte; es ist wohl eher anzunehmen vor ihm. Daher können wir auch nicht angeben, ob Ptolemäus diesen zweiten Grund von ihm übernahm oder aus eigener Erfahrung kennen lernte. Bei seinen Untersuchungen über die verschiedenen Erdformen erörtert Ptolemäus auch die Zylindergestalt, wobei er die Grundflächen in die Richtung der Pole verlegt. Er nimmt hier also bereits eine Krümmung in der Ostwestrichtung an und zeigt, daß auch eine Krümmung in der Nordsüdrichtung stattfindet.

Mit der Vernichtung der alexandrinischen Schule durch den Araber Omar um die Mitte des 7. Jahrhunderts, also nach etwa tausendjährigem Bestehen, ging auch die damals für die ganze Welt einzige Bibliothek zugrunde, und die Wissenschaften versanken wieder in einen traurigen Urzustand. Man fiel wieder zurück in die kindlich-naiven Vorstellungen des homerischen Zeitalters, und die ganze Entwicklung der Kenntnisse mußte wieder von vorn beginnen. Da man in der christlichen Kirche zunächst auch alle Naturerkenntnis allein aus der Heiligen Schrift schöpfen wollte, so verwarfen die Kirchenväter, wie Lactantius und Augustinus, die Lehre von der Kugelgestalt der Erde, die in der Heiligen Schrift nicht nachzuweisen war. Dabei

verlor man sich in das Gebiet einer ganz abenteuerlichen Theosophie. Es kann nicht wundernehmen, wenn sich nun wieder lange Zeit solche Phantasiegebilde, wie z. B. das des Alexandriners Kosmas Indopleustes, aufrechterhalten konnten. Um den Auf- und Untergang der Gestirne zu erklären, stellte man sich — gerade wie im grauen Altertum — die Erde als eine Masse vor, die wie ein Berg aus einer vom Ozean rings umflossenen viereckigen Fläche emporragt. Die Sonne umkreist in dieser Welt beständig die Erdfeste, und dadurch, daß sie hinter ihr hervortritt oder hinter ihr verschwindet, entsteht Auf- und Untergang. Man entwarf Karten, sogenannte Radkarten, die die Erde, vom Ozean umschlungen, darstellten, mit Jerusalem, dem Ausgang der christlichen Lehre, im Mittelpunkte.

Es ist recht bezeichnend für die Entwicklung der kosmischen Anschauungen, daß gerade die Kirche, die zuerst in falsch verstandener Schriftgläubigkeit zu solchen Irrtümern den Anlaß gab, es war, aus der auch die neuen Bestrebungen zur Erkenntnis der Wahrheit hervorgehen sollten. Die Regelung der kirchlichen Feste, das Bedürfnis eines geordneten Kalenders, wie überhaupt einer genauen Zeitregulierung, erforderte die Beobachtung der himmlischen Vorgänge. Die periodische Wiederkehr der himmlischen Erscheinungen und die damit im Zusammenhang stehende periodische Wiederkehr in den Veränderungen auf der Erde suchte man mathematisch und physikalisch zu erklären. So führten die Bestrebungen derselben Kirche, die zuerst durch die wörtliche Deutung der Heiligen Schrift das Vorwärtsschreiten der Erkenntnis gehemmt hatte, doch wieder zur Reform der Wissenschaft. In der Absicht, der Ehre Gottes zu dienen, duldete die Kirche keine Überschreitung der von ihr aufgestellten Lehrsätze; das gleiche Ziel mußte auch für die Wissenschaft aufgestellt werden, wenn sie in ungestörter Weise ihren Forschungen nachgehen wollte.

Wiedergeburt der ptolemäischen Lehren.

Man muß es daher als einen ganz besonderen Fortschritt in der Geschichte betrachten, als die Lehren des Ptolemäus von neuem wieder in Aufnahme kamen. Wir finden zwar schon in Beda Venerabilis, einem bis etwa in die Mitte des 8. Jahrhunderts lebenden englischen Mönche, einen überzeugten Anhänger der ptolemäischen Lehren, allein seine Werke fanden bei dem damaligen höchst spärlichen literarischen Verkehr nur eine sehr langsame Verbreitung. Erst im 10. und 11. Jahrhundert begegnen wir einem entschiedenen Aufschwung, hauptsächlich veranlaßt durch den zunehmenden Verkehr mit byzantinischem und spanisch-maurischem Wissen. In der Abgeschiedenheit der Klöster erwachte allmählich ein neues geistiges Leben, und man nahm das Studium der alten Klassiker wieder auf, soweit diese, und zwar meistens durch die fleißigen Übersetzungen der Araber, desselben Volkes, das zuvor die Vernichtung der alexandrinischen Schule herbeigeführt hatte, der Nachwelt erhalten geblieben waren. Man fing jetzt an, die bisherigen Radkarten zu verwerfen und durch Erdkarten zu ersetzen; man versuchte also, die gekrümmte Erdoberfläche in Projektion wiederzugeben. Endlich brach sich die ptolemäische Weltanschauung allgemein Bahn, und

man kann etwa das Erscheinen der Sphaera mundi des um 1256 verstorbenen Engländers Johannes de Sacrobosco als den Zeitpunkt ansehen, wo die Lehre von der Kugelgestalt der Erde wissenschaftlich wieder völlig gesichert war. Dieses Werk, das im Grunde genommen einen recht mittelmäßigen Wert hat, trotzdem aber noch bis ins 17. Jahrhundert an der Spitze der astronomischen Lehrbücher stand, gibt so recht Zeugnis, wie tief die Wissenschaft wieder gesunken war. Obwohl man aber die Kugelgestalt der Erde jetzt allgemein annahm, so war es doch noch recht schwer, sich mit all den daraus hervorgehenden Konsequenzen zu befreunden. Wir können es jetzt nicht mehr recht begreifen, welche Schwierigkeiten es machte, sich mit den Begriffen des Oben und Unten, der Gegenfüßler usf. oder z. B. mit der Vorstellung, daß das Wasser von der Erdkugel nicht abfließt, abzufinden. Uns werden eben diese Anschauungen von Kindheit auf anerzogen, wir nehmen sie als etwas ganz Selbstverständliches hin, ohne uns weiter bewußt zu werden, welche Abstraktionskraft dazu gehört.

Die ersten Versuche des Eratosthenes und Posidonius und das Prinzip der Breitengradmessung.

III. Bestimmung der Größe der Erde durch Messung. Sobald man einmal eine klare Vorstellung von der Gestalt der Erde erlangt hatte und sie als einen geometrischen Körper betrachtete, mußte auch die Idee wach werden, diesen Körper auszumessen, d. h. die ihn charakterisierenden Stücke in Einheiten eines bekannten Maßstabes anzugeben. Zur Bestimmung einer Kugel genügt aber die Kenntnis ihres Radius oder auch ihres Umfanges. Daß die Größe der Erde bereits vor der Zeit der alten Griechen durch Messung bestimmt worden wäre, ist wohl kaum anzunehmen. Wenn man in den Schriften der Alten Zahlenangaben findet, wie etwa bei Aristoteles oder Archimedes, so soll offenbar nur eine Größenordnung damit angedeutet sein, aber kein Messungsergebnis.

Nachdem durch Aristoteles die Lehre von der Kugelgestalt begründet war, dauerte es doch noch lange Zeit, bis sie sich weiter verbreitete. Erst etwa ein Jahrhundert später kam sie durch Archimedes und Eratosthenes wieder in Aufnahme. Der letztere war es, der auf die Verschiedenheit der Kulminationshöhe oder Meridianzenitdistanz eines Gestirns für zwei Orte auf demselben Meridian seine Messungsmethode gründete. Wir hatten gesehen, daß dieser Satz bereits von Aristoteles als einer der mathematisch einwandfreien Gründe zum Beweise der Erdrundung herangezogen wurde. In Syene, dem jetzigen Assuan, befand sich ein tiefer Brunnen, von dem berichtet wurde, daß er am Tage des Sommersolstitiums bis auf den Grund beschienen sei. An diesem Tage mußte hier also die Sonne gerade im Zenit stehen. Eratosthenes maß nun an demselben Tage in Alexandrien die Zenitdistanz der Sonne, wobei er sich des von Aristarch erfundenen Skaphion, eines verbesserten Gnomons, das die Zenitdistanz direkt angab, bediente. Da die Zenitdistanz in Syene Null war, so gab die in Alexandrien gemessene ohne weiteres die Amplitude des zwischen beiden Orten enthaltenen Bogens an, sie betrug $^1/_{50}$ des Kreisumfanges. Die Länge dieses Bogens war aber

durch die ägyptische Landesvermessung bekannt zu 5000 Stadien. Mit diesen Daten erhielt er durch ein einfaches Regeldetriexempel für den Erdradius rund 40000 Stadien.

Dieses Resultat leidet nicht bloß an der Ungenauigkeit der damaligen Messungen, es war auch auf falsche Annahmen gegründet. Syene und Alexandrien liegen nicht unter demselben Meridian, sondern sind etwa 3^0 in Länge voneinander entfernt. Man besaß eben noch keine Methoden, um durch astronomische Beobachtungen die Längendifferenz zweier Meridiane zu bestimmen. Man mußte sich daher mit rohen Annahmen begnügen. Eratosthenes hatte als Ausgang aller Längen einen Meridian gezogen, von dem er annahm, daß er durch Meroë, Syene, Alexandria, Rhodus, Karien, Ionien, Troas, den Hellespont, Byzanz und die Mündung des Borysthenes geht. Dieser Nullmeridian spielt in der ganzen alten Geographie eine große Rolle; er wurde auch später von Posidonius benutzt. Erst Ptolemäus macht darauf aufmerksam, daß Syene und Alexandria in Länge voneinander etwas verschieden sind, wenn er auch nicht den wahren Betrag, sondern nur etwa die Hälfte angibt. Eine zweite nicht ganz richtige Annahme ist, daß die Sonne zur Zeit der Sommersonnenwende in Syene gerade im Zenit stehen soll. Mag dem nun aber sein, wie ihm wolle, jedenfalls ist der Gedankengang bei dieser ersten Gradmessung ein ganz richtiger und bildet noch heute die Grundlage des Prinzips der Breitengradmessungen: Es wird die Länge eines Meridianbogens und der zugehörige Zentriwinkel gemessen. Der erste Teil der Messung ist rein terrestrischer Natur, der zweite kann aber nur auf astronomischem Wege durch Bestimmung der Gestirnshöhen erhalten werden, und so ist die Astronomie auch zur Ausmessung der Erde selbst unentbehrlich. Eratosthenes benutzte die Sonne, während etwa anderthalb Jahrhunderte später Posidonius bei einer ähnlichen Erdmessung Beobachtungen des Sterns Kanopus (α Argus) heranzog. Von diesem hellen Stern sagt er, daß er in Griechenland gar nicht gesehen wird, wenn man aber in der Mittagslinie von Norden nach Süden geht, so wird er zuerst in Rhodus, und zwar gerade eben nur am Horizont, sichtbar. Indem er sich nun korrespondierende Beobachtungen dieses Sterns in Alexandrien verschaffte, gelangte er zur Kenntnis des zwischen beiden Orten enthaltenen Zentriwinkels. War ihm jetzt auch noch die Entfernung beider Orte bekannt, so konnte er daraus, wie Eratosthenes, die Dimensionen der Erde ableiten.

Daß Eratosthenes und Posidonius nur Breitengradmessungen ausführten, liegt in der bequemen Bestimmungsweise von Polhöhen. Hätten sie bereits über Mittel verfügt, auch den Längenunterschied zweier Orte sicher zu bestimmen, so würden sie wohl ebenso auch schon Messungen im Parallelkreise vorgenommen haben, wie es der zweite der von Aristoteles zum Beweise der Erdrundung herangezogenen Gründe verlangt.

Fortschritt durch die Araber im Mittelalter.

Mit diesen Arbeiten schien man sich zu begnügen, wenigstens begegnet man bis zum 9. Jahrhundert keinem weiteren Versuch; erst bei den Arabern taucht die Idee einer Bestimmung der Größe der Erde wieder auf. Unter

dem dritten Kalifen Al Mamun im Jahre 827 n. Chr. wurde in der Ebene von Sennaar in Mesopotamien die Länge eines Grades im Meridian gemessen. Der Fortschritt gegen früher aber bestand darin, daß man längs des Meridians eine Strecke abschritt, deren Endpunkte eine Polhöhendifferenz von 1^0 aufwiesen, und daß diese Strecke tatsächlich mit einer Meßleine oder Meßlatte ausgemessen wurde. Man erhielt als Resultat, daß $56\frac{1}{3}$ arabische Meilen auf einen Meridiangrad kommen. Die arabische Meile enthält 4000 Ellen, jede Elle wird in 24 Zoll, jeder Zoll in 6 Gerstenkörner geteilt. Es ist uns aber nirgends das Verhältnis eines dieser Maße zu einem uns bekannten angegeben. Wir können daher auch nicht wissen, wie genau das Resultat dieser Messung ist. Es ist wohl nicht anzunehmen, daß den Arabern die Arbeiten von Eratosthenes und Posidonius als Muster vorgeschwebt haben, da man sich zu dieser Zeit erst mit vieler Mühe in das nicht eben leichte Studium des Almagest einzuarbeiten begann.

Fernels Versuch.

Auch diese Arbeit steht im Laufe mehrerer Jahrhunderte vereinzelt da. Erst im Jahre 1525 unternimmt das ähnliche Experiment der französische Arzt Fernel, indem er die Länge eines von Paris bis Amiens reichenden Meridianbogens von 1^0 Amplitude aus der Anzahl der Umdrehungen seiner Wagenräder, deren Umfang er genau gemessen hatte, bestimmte. Wegen der Unebenheit des durchlaufenen Weges verringerte er das erhaltene Resultat um einen kleinen Betrag, führte also gewissermaßen, wenn auch nur schätzungsweise, eine Reduktion auf den Meridian und auf den Horizont aus. Es macht sich hier also schon das Bedürfnis geltend, aus den Unebenheiten der physischen Erdoberfläche eine mathematische Oberfläche herauszuschälen. Immer aber krankt das ganze Verfahren noch daran, durch direkte Messung die Länge eines Meridiangrades ermitteln zu wollen, denn einmal ist es sehr schwer, beim Abschreiten der Strecke die Meridianrichtung immer innezuhalten, und dann ist die Ausmessung der ganzen Strecke nur in recht unvollkommener Weise möglich.

Die Begründung der Methode der Triangulation durch Snellius.

Es war daher ein bedeutsamer Fortschritt in der Geschichte der Gradmessungen, als man die direkte Methode verließ und auf indirektem Wege die sich in den Weg stellenden Schwierigkeiten zu umgehen trachtete. Dieser Umschwung wurde durch die von dem Holländer Willebrord Snellius im Jahre 1615 bei seiner Breitengradmessung zwischen Alkmaar und Bergen op Zoom angewandte Methode der Triangulation herbeigeführt. Das wesentliche daran ist, daß er die beiden Orte, deren Pohlhöhendifferenz durch astronomische Beobachtungen bekannt war, durch eine Dreieckskette verband und aus dieser den Abstand der Parallelkreise beider Orte durch Rechnung herleitete. Hierzu ist es aber nötig, daß man von allen Dreiecken die Winkel und außerdem von einer der Dreiecksseiten die Länge und die Richtung gegen den Meridian, also ihr Azimut, kennt. Die gesamte Messungsarbeit zerfällt hier also, wenn man von dem astronomischen Teil absieht, der Hauptsache nach in Winkelmessungen, die sich mit ziemlicher Sicherheit ausführen lassen, und in die Messung einer nur kleinen Basis, deren Lage man

sich so günstig wie nur irgend möglich wählen kann und die mit der größten Sorgfalt auszumessen ist. Noch auf einen ganz wesentlichen Umstand nahm dabei Snellius Rücksicht, nämlich daß die Dreieckspunkte in verschiedenen Höhen, die Flächen der Dreiecke also in verschiedenen Ebenen liegen. Er reduzierte demgemäß jedes Dreieck auf den Horizont und das ganze Dreiecksnetz auf das Niveau des Meeresspiegels. Hatte Eratosthenes die Idee zu einer Breitengradmessung gegeben, so zeigte jetzt Snellius durch seine Triangulationsmethode, wie diese Idee praktisch auszuführen ist, und er hat hierdurch die Grundlagen für alle unsere Gradmessungen geschaffen. Die Arbeit des Snellius fand durch Jean Picard in der 1669—70 ausgeführten Breitengradmessung zwischen Malvoisine bei Paris und Amiens eine völlige Nachahmung, nur war Picard insofern glücklicher, als man inzwischen gelernt hatte, die Winkelmeßinstrumente mit Fernrohr und Fadenkreuz zu versehen; außerdem war man auch noch in den Besitz der Logarithmen gelangt, die die umfangreichen Rechenarbeiten ganz erheblich erleichterten.

Zweifel an der Kugelgestalt und Vermutung einer Abplattung.

Hier setzt die eigentliche wissenschaftliche Erforschung der wahren Erdgestalt ein. Man begann an einer reinen Kugelgestalt der Erde zu zweifeln. Wenn solche Zweifel schon früher auftraten, so beruhten sie nur auf Vermutungen, die jeder sicheren Unterlage entbehrten. Bei Picard waren es Analogieschlüsse, die ihn zu der Vermutung einer ellipsoidischen Gestalt der Erdoberfläche führten, da die Planeten im Fernrohre eine solche zeigten. Huyghens und Newton wiesen auf Grund der allgemeinen Sätze der Mechanik nach, daß infolge der zugleich mit der Anziehungskraft wirkenden Zentrifugalkraft die Erde nicht die Kugelform beibehalten könne, sondern notwendig die Gestalt eines an den Polen abgeplatteten Rotationsellipsoids, eines sogenannten Sphäroids, haben müsse. Für diese aus der Theorie gefolgerte Vermutung schien auch eine von dem französischen Astronomen Richer beobachtete Tatsache zu sprechen. Richer war von der Pariser Akademie nach Cayenne in Südamerika geschickt worden, um dort Beobachtungen zur Bestimmung der Marsparallaxe anzustellen. Er hatte sich zu dem Zwecke ein Pendel mitgenommen, das er in Paris sorgfältig auf Sekundenlänge abgestimmt hatte. Allein in Cayenne fand er, daß die Schwingungen verzögert waren, und daß es daher verkürzt werden mußte, um Sekundenpendel zu bleiben. Daß es hiermit seine Richtigkeit hatte, erkannte er, als er nach Paris zurückkehrte, wo er wiederum die ursprüngliche Länge herstellen mußte, wenn in jeder Sekunde eine Schwingung erfolgen sollte. Zur Entscheidung beschloß man, die Picardsche Gradmessung nördlich bis Dünkirchen, südlich bis Collioure auszudehnen. Die Messung begann 1680 unter Cassini I und Lahire, wurde aber dann 20 Jahre unterbrochen und von Cassini II, Lahire und Maraldi fortgesetzt und 1718 beendet. Das Resultat der Messungen bewies aber im Gegenteil, daß die Erde ein nach den Polen zu verlängertes Ellipsoid sein müsse, da sich ein Meridiangrad aus dem südlichen Teile größer ergab als aus dem nördlichen. Die Franzosen verteidigten dieses Messungsergebnis, die Engländer beharrten bei ihrer aus der Theorie gefolgerten An-

sicht. Fast ein halbes Jahrhundert dauerte der Streit und hatte zur Folge, daß man sich von seiten der Pariser Akademie 1735 dazu entschloß, zwei Expeditionen auszusenden, eine nach Peru in die Gegend des Äquators, die andere möglichst nördlich nach Lappland in etwa 66° Breite. Die Messung in Lappland unter Maupertuis, Clairaut, Camus, Lemonnier, Outhier und Celsius fand bereits im Jahre 1737 ihren Abschluß, die Expedition nach Peru unter Bouguer, La Condamine, Godin, Juon und Ulloa war aber erst 1744 beendet. Das Ergebnis war, daß die von Huyghens und Newton aus der Theorie gefolgerten Vermutungen vollständig bestätigt wurden, daß also die Erde ein an den Polen abgeplattetes Rotationsellipsoid ist. Auch die Revision der französischen Gradmessung durch Cassini III und Lacaille führte zu demselben Ergebnis.

Das Ellipsoid nur eine zweite Annäherung.

Dieser Erfolg regte zu mannigfachen Nachahmungen und Versuchen auch in anderen Ländern an, und es galt dabei auch noch eine nicht zu beseitigende Mißstimmigkeit aufzuklären. Um die Konstanten der Meridianellipse, nämlich die halbe große Achse a und die halbe kleine Achse b, zu bestimmen, bedarf es der Ergebnisse zweier Gradmessungen, die in möglichst verschiedenen Breiten angestellt sind. Das charakteristische Merkmal für die Form der Ellipse ist die Größe der Exzentrizität. Man pflegt aber statt ihrer die Abplattung, d. i. den Unterschied der halben großen und der halben kleinen Achse, ausgedrückt in Einheiten der halben großen Achse, also das Verhältnis $\frac{a-b}{a} = \alpha$ anzugeben. Wenn man nun die bisher vorhandenen drei großen Gradmessungen, die französische, die lappländische und die peruanische, zu je zweien miteinander verbindet, so erhält man jedesmal einen besonderen Wert für die Abplattung. Aber diese Werte stehen in keinem Einklang miteinander. So ergibt sich aus der französischen und der lappländischen Gradmessung der Wert 1 : 145, aus der französischen und der peruanischen aber der Wert 1 : 304.

Auch alle zunächst folgenden Versuche zur Klärung des Problems der Figur der Erde müssen als unzureichend angesehen werden; teils lag es an der noch nicht genügenden Genauigkeit der Meßwerkzeuge, teils aber auch an der mangelnden Zuverlässigkeit in der Ausführung der Messungen selbst. Erst mit der neuen französischen Gradmessung, die 1792 unter den Stürmen der Revolution von Méchain und Delambre in mustergültiger Weise unternommen wurde und sich bis zum Jahre 1808 ausdehnte, deren offizieller Zweck die Bestimmung des Meters als Naturmaß war, beginnt die Reihe aller jener denkwürdigen Gradmessungen, die wesentlich zu unserer heutigen Erkenntnis der Figur der Erde beitragen sollten. In fast allen zivilisierten Ländern begann man, Gradmessungsarbeiten auszuführen. Aber auch die Resultate dieser neuen Messungen konnten nichts dazu beitragen, um die genannte Mißstimmigkeit zu beseitigen. Je nachdem welche Gradmessungen man miteinander verband, erhielt man jedesmal einen anderen Wert für die Abplattung. Die Unterschiede dieser verschiedenen Abplattungswerte waren

so groß, daß man sie unmöglich den bei den Messungen unvermeidlichen Beobachtungsfehlern zur Last legen konnte; sie deuteten auf geringe Abweichungen der wahren Erdfigur vom Rotationsellipsoid. Um sich nun aber der wahren Gestalt und Größe der Erde möglichst zu nähern, versuchte man, ein Rotationsellipsoid zu ermitteln, das sich den zuverlässigsten Messungen gleichzeitig möglichst gut anpaßt. Die allgemeine Aufgabe lief darauf hinaus, n Unbekannte aus mehr als n Gleichungen zu bestimmen und die zwischen den einzelnen Gleichungen bestehenden Widersprüche auszugleichen; sie führte zu der von Legendre und Gauß begründeten Methode der kleinsten Quadrate, nachdem sich bereits vorher Laplace ein Ausgleichungsverfahren für seine Zwecke zurechtgelegt hatte.

Das Geoid

Man hatte jetzt einsehen gelernt, daß wie die Kugel nur als erste Annäherung, so das Sphäroid als zweite Annäherung an die wahre Erdgestalt zu betrachten ist. Man wurde zu einer schärferen Definition dessen, was man unter den Begriffen Gestalt und Größe der Erde zu verstehen hat, gedrängt. Die Erde wurde nicht mehr bloß als ein geometrischer, sondern auch als ein physikalischer Körper betrachtet, und es kam darauf an, außer den geometrischen auch die dynamischen Konstanten zu bestimmen, wenn man sich über ihre Gestalt und Größe ein richtiges Bild machen wollte. Alle derartigen Betrachtungen knüpfen sich nicht an die physische Erdoberfläche, sondern an die sogenannte mathematische Erdoberfläche, indem man von allen zufälligen Unregelmäßigkeiten, die sich in Bergen und Tälern kundgeben, ganz absieht und nur die Grundform ins Auge faßt. Diese mathematische Oberfläche wird durch die als ruhend angenommene Oberfläche der Meere, wenn man sich diese unter den Kontinenten etwa durch ein System von Kanälen miteinander verbunden denkt, dargestellt, für die J. B. Listing den Namen Geoid eingeführt hat. Sie ist eine Niveaufläche, die Fläche des über die ganze Erde ausgebreitet gedachten Meeresspiegels, und in jedem ihrer Punkte schneidet sie die Richtung der Schwerkraft normal.

Die geographische Breite eines Ortes ergibt sich unmittelbar aus der im Meridian gemessenen Zenitdistanz eines Gestirns, dessen Deklination bekannt ist, und ist also leicht und verhältnismäßig sicher zu bestimmen. Man findet daher Beobachtungen dieser Art schon frühzeitig vor, und es ist leicht erklärlich, daß man zunächst nur längs der Meridiane die Erdmessungen ausdehnte, d. h. sogenannte Breitengradmessungen ausführte, denn hierbei wird die Amplitude des gemessenen Bogens aus der Differenz der Polhöhen der Endpunkte abgeleitet. Die Bestimmung der Krümmung der Erde in der Meridianrichtung stützt sich auf den ersten Erfahrungsgrundsatz der Alten für die Erdrundung, daß sich nämlich bei einer Bewegung längs eines Meridians die Polhöhe stetig ändert. Der zweite Erfahrungsgrundsatz der Alten, daß bei einer Bewegung im Parallel eine Verfrühung bzw. Verspätung des Auf- oder Unterganges der Gestirne eintritt, führt zur Bestimmung der Krümmung der Erde in der Richtung der Parallelkreise. Aber die Bestimmung des geographischen Längenunterschiedes zweier Orte war mit Schwierigkeiten verknüpft und

ergab zunächst nur sehr unsichere Resultate. Erst durch die allmähliche Entwicklung und Vervollkommnung der Zeitmessung und Signalgebung wurden die Erdmessungen längs des Parallels, die sogenannten Längengradmessungen, vorbereitet. Als Signale, die für beide Orte gleichzeitig wahrnehmbar waren, verwandte man einerseits künstliche Lichtsignale, wie Blinkfeuer, Pulverblitze, andererseits Himmelserscheinungen, in der Hauptsache Okkultationen, wie Sonnen- und Mondfinsternisse, Verfinsterungen der Jupitertrabanten, Sternbedeckungen, daneben auch das Aufleuchten von Sternschnuppen oder die Bewegung des Mondes unter den Fixsternen. Am ältesten mag wohl die Methode der Mondfinsternisse sein, durch die schon Ptolemäus die Mittelmeerländer geographisch festzulegen suchte. Aber alle diese Messungen standen noch weit hinter der Genauigkeit der Polhöhenbestimmungen zurück. Erst in neuerer Zeit, als gegen Mitte des vorigen Jahrhunderts durch Walker und Gould in Nordamerika der elektrische Telegraph in den Dienst der Längenbestimmungen gestellt wurde, erlangten die Längengradmessungen eine derartige Genauigkeit, daß sie mit den Breitengradmessungen vollständig konkurrieren können. Das bedeutendste Unternehmen dieser Art ist die 1857 von F. W. Struve vorgeschlagene und begonnene Längengradmessung im 52. Parallel. Während durch die Breitengradmessungen Gestalt und Größe der Meridiane bestimmt werden, geben die Längengradmessungen Aufschluß darüber, inwieweit die Erde wirklich als Rotationskörper betrachtet werden kann.

Die Lotabweichungen und die allgemeine Aufgabe der Bestimmung der Figur der Erde.

Wäre die Erde in aller Strenge ein abgeplattetes homogenes Rotationsellipsoid, so würde die Normale in jedem Punkte identisch sein mit der Schwererichtung; allein, da sie von einem solchen abweicht, so treten auch Differenzen zwischen diesen beiden Richtungen auf, d. h. das geodätische Zenit fällt im allgemeinen mit dem astronomischen nicht zusammen; den Unterschied beider Richtungen nennt man die Lotabweichung. Geht man von einem astronomisch bestimmten Punkte aus und berechnet auf Grund eines angenommenen Ellipsoids die Lage eines anderen durch Triangulation mit ihm verbundenen Punktes, so gibt die Vergleichung der so berechneten Koordinaten (Länge und Breite) dieses zweiten Ortes mit den tatsächlich beobachteten Unterschiede, nämlich die Differenz der Lotabweichungen beider Orte. In der Untersuchung dieser erwuchs der Geodäsie eine ganz neue Aufgabe. Es kam jetzt darauf an, durch einheitliches Zusammenarbeiten der Staaten und Länder möglichst zahlreiche Untersuchungen über die Krümmungsverhältnisse der Erde längs der Meridiane und längs der Parallelkreise anzustellen. In diesem Sinne entwarf Generalleutnant J. J. Baeyer im Jahre 1861 den Plan zu einer Mitteleuropäischen Gradmessung, die bereits im darauffolgenden Jahre ins Leben trat und sich 1867 zur Europäischen Gradmessung, dann zur Internationalen Erdmessung erweiterte und als solche noch jetzt unausgesetzt an der großen Aufgabe, die Figur der Erde in geometrischer und dynamischer Hinsicht zu bestimmen, weiterarbeitet.

Vergegenwärtigt man sich kurz den Gedankengang, der zu einem rationellen Studium der Gestalt und Größe der Erde führt, so kommt es, wie bei allen wissenschaftlichen Untersuchungen komplizierter Erscheinungen, auch hier darauf an, aus der scheinbaren Regellosigkeit eine zweckmäßige mathematische Grundform herauszuschälen, die nun gewissermaßen als Richtschnur für die Verfolgung des wahren Verlaufes dient. Die physische Erdoberfläche mit ihren Bergen und Tälern wird durch eine Niveaufläche, und zwar die mit der Oberfläche des als ruhend gedachten Meeres zusammenfallende ersetzt. Hierdurch wird sie erst für eine wissenschaftliche Untersuchung zugänglich gemacht. Das Geoid, wie man diese ideale Erdfigur nennt, hat sehr nahe die Form eines abgeplatteten Rotationsellipsoids. Denkt man sich nun ein abgeplattetes Rotationsellipsoid, das sich dem Geoid möglichst nahe anschmiegt, dessen Mittelpunkt mit dem Schwerpunkt des Geoids und dessen kleine Achse mit der mittleren Lage der Rotationsachse der Erde zusammenfällt, so wird dieses das mittlere Erdellipsoid genannt. Wie aber das Geoid zum mittleren Erdellipsoid liegt, läßt sich erst auf Grund geophysikalischer Messungen, wenn man auf die Massenverteilung im Innern der Erde näher eingeht, abschätzen. Bei Gradmessungen kommt nicht die Lage der Rotationsachse im Erdkörper, sondern lediglich nur ihre Richtung in Frage, insofern sich auf diese die geographischen Koordinaten, Länge, Breite und Azimut, beziehen. Man kann daher bloß sagen, daß das einer Gradmessung angepaßte Ellipsoid im allgemeinen nur achsenparallel mit dem mittleren Erdellipsoid ist. Solche Ellipsoide nennt man Bezugs- oder Referenzellipsoide. Je nachdem wie die durch Gradmessungen festgestellten Abweichungen gegen das willkürlich angenommene Bezugsellipsoid ausfallen, wird man letzteres seiner Gestalt, Größe und Lage nach so abändern, daß die gefundenen Abweichungen möglichst klein werden.

Ergebnisse der Erdmessungsarbeiten.

Von den zahlreichen bisher berechneten Erdellipsoiden seien hier die Dimensionen der wichtigsten angeführt, wobei a die halbe große Achse, b die halbe kleine Achse und α die Abplattung bezeichnet:

		a	b	$1:\alpha$
Bessel	1837/41	6377397 m	6356079 m	299.15
Clarke	1866	6378206 „	6356584 „	294.98
„	1880	6378249 „	6356515 „	293.47
		legale Meter		
Helmert	1907	6378200 „	6356818 „	298.3
Hayford	1910	6378388 „	6356909 „	296.96.
		internat. Meter		

Auf die Bedeutung von legalem und internationalem Metermaß wird im folgenden Abschnitt noch näher eingegangen werden. Es sei hier nur erwähnt, daß die in legalem Maße ausgedrückten Werte von a und b um 85 Meter zu vergrößern sind, wenn man zum internationalen Maß übergeht, und umgekehrt, daß die internationalen Angaben um 85 Meter zu verkleinern sind, um legale zu erhalten.

Wie man aus den Zahlen ersieht, ergeben die neueren Messungen für die halbe große Achse einen fast 1000 m größeren Wert, als Bessel gefunden hatte. Trotzdem behalten die Besselschen Dimensionen noch eine Bedeutung, da sie lange Zeit allen auf die Erddimensionen bezugnehmenden Berechnungen zugrunde gelegt wurden. Überdies werden unsere Meilenmaße, die geographische Meile und die Seemeile, als aliquote Teile des Besselschen Erdäquators und des Besselschen Erdmeridians definiert. Helmert legte seinen Berechnungen die in Europa gemessenen Meridian- und Parallelbogen zugrunde und bestimmte die Abplattung aus den letzten bis 1900 erfolgten Schweremessungen; dieser Wert der Abplattung muß als einer der besten betrachtet werden. Überhaupt dürfte nach ihm die Abplattung den Wert 1 : 296 nicht übersteigen. Als die beste Annäherung an das mittlere Erdellipsoid muß jetzt das von Hayford aus den Vermessungen der Coast and Geodetic Survey in den Vereinigten Staaten von Nordamerika abgeleitete Ellipsoid, das auch von der Pariser astronomischen Konferenz 1910 angenommen worden ist, gelten. Man kann nach den neuesten Untersuchungen wohl sagen, daß der Äquatorhalbmesser auf etwa 100 Meter, die Abplattung α auf etwa $^1/_{300}$ ihres Betrages sicher bestimmt ist, und daß die Abweichungen des Geoids vom mittleren Erdellipsoid nur in seltenen Fällen den Betrag von 100 Meter überschreiten.

Die Maßeinheit und ihre Wahl.

IV. Das irdische Längenmaß und seine Definition. Die Dimensionen der Erde werden in derselben Maßeinheit erhalten, die bei den Basismessungen zugrunde gelegt wurde. Von der Genauigkeit dieser Messungen hängt natürlich das berechnete Resultat ab. Das Messen ist ja nichts anderes als ein Vergleichen einer beliebigen Länge mit einer uns gegebenen, völlig bekannten Länge, die wir zur Maßeinheit wählen. Das Resultat des Messens ist eine Verhältniszahl, eine absolute Zahl, wir nennen sie die Größe der gemessenen Länge. Die Größenangabe ist von der angenommenen Maßeinheit abhängig. Je größer die Maßeinheit gewählt ist, desto kleiner, je kleiner die Maßeinheit, desto größer ist die Zahl, die das Resultat der Messung ausdrückt. Es ist daher klar, daß das Messungsresultat für uns nur dann seinen Wert behält, wenn wir die zugrunde gelegte Maßeinheit kennen, sei es, daß wir sie im Original oder einer getreuen Kopie besitzen, sei es, daß uns ihr Zusammenhang mit einer anderen bekannten Maßeinheit gegeben ist, sei es endlich, daß wir in der Lage sind, sie auf Grund einer Definition jederzeit wiederherzustellen. So kommt es, daß die Längenangaben der Alten, bei denen das Stadium als Einheit angenommen ist, für uns keine wesentliche Bedeutung haben, da wir eben die genaue Länge des Stadiums nicht kennen. Überdies gab es noch verschiedene Stadien, wie das altägyptische, olympische, pythische, altrömische, und es läßt sich oft nicht einmal entscheiden, welches von diesen gemeint ist.

Da die Größenangabe immer nur eine Verhältniszahl ist, so wird man zweckmäßig die Maßeinheit, die ja an und für sich ganz beliebig ist, so wäh-

len, daß man sich von einer Größenangabe eine bequeme Vorstellung machen kann. Unser irdisches Maß ist jetzt fast durchgängig das Meter. Zur Bequemlichkeit benutzen wir aber auch, ganz wie es der jeweilige Zweck erheischt, einen aliquoten Teil oder ein bestimmtes Vielfaches als neue Maßeinheit. Kleine Strecken geben wir in Zentimetern oder Millimetern an, ja bei mikroskopischen Messungen nehmen wir das Mikron ($\mu = 0.001$ mm) zur Einheit, während wir hingegen bei größeren Entfernungen das Kilometer oder wohl auch die Meile verwenden. Es drängt sich uns hier ein notwendiges Prinzip auf, nämlich den Maßstab immer der Größe der zu messenden Entfernungen entsprechend so zu variieren, daß wir zu Verhältniszahlen gelangen, von denen wir uns eine klare Vorstellung machen können. Dies tritt noch mehr hervor, wenn wir auf Entfernungen im Weltenraum übergehen. Hier würde man unter Beibehaltung der für irdische Entfernungen benützten Maßeinheiten zu unvorstellbar großen Verhältniszahlen gelangen. Man wählt daher die Größe der Erde selbst, und zwar den Äquatorhalbmesser, zur Maßeinheit, wenn man die Größe und Entfernung anderer Himmelskörper angeben will. Man gewinnt eine klarere Vorstellung, wenn man sagt, die mittlere Entfernung des Mondes von der Erde beträgt 58 Äquatorhalbmesser der Erde, als 50000 geographische Meilen; oder der Radius der Sonne beträgt 112 Erdäquatorhalbmesser, als 95000 geographische Meilen. Aber je weiter wir in den Weltenraum vordringen, desto mehr macht sich das Bedürfnis nach noch größeren Maßeinheiten geltend. Für die Ausmessungen der Entfernungen in unserem Planetensystem wird die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne als Einheit genommen. Man gewinnt eine ganz andere Anschauung, wenn man z. B. die mittlere Entfernung des Saturn von der Sonne durch 9.5 Erdbahnhalbmesser ausdrückt, als wenn man dafür 191 Millionen geographische Meilen angibt. Schreitet man aber noch weiter bis in die Fixsternregionen, so erscheint auch der Erdbahnhalbmesser wieder viel zu klein, um eine zweckmäßige Maßeinheit abzugeben. Man führt das Lichtjahr, d. h. den Weg, den das Licht in einem Jahre durcheilen würde, oder auch die Sternweite, d. h. die Entfernung von 206 265 Erdbahnhalbmessern, der eine Parallaxe von einer Bogensekunde entspricht, als neue Maßeinheiten ein. Die Entfernung des Sternes Wega (α Lyrae) beträgt hiernach etwa 30 Lichtjahre oder 10 Sternweiten.

Urmaße.

Die ersten Maßeinheiten der frühesten Kulturstufen entlehnte der Mensch dem eigenen Körper, und das war am natürlichsten, ein jeder führte sie stets bei sich und hatte sie deutlich vor Augen. Fast kein Körperabschnitt des Menschen blieb als Maßangabe unbenutzt, und noch jetzt bedienen wir uns derselben, wo es eben nur auf ungefähre Größenangaben, nicht auf Messungen im eigentlichen Sinne ankommt. Auch bei der späteren Einführung genauer Maßsysteme haben diese natürlichen Maßangaben zur Richtschnur gedient. Um die Tiefe eines Gewässers oder die Höhe des Getreides auf dem Felde anzugeben, sagt man, es reicht bis zu den Knöcheln, bis zu den Knien, Hüften, Schultern usw. Bezeichnungen wie Mannshöhe, Armlänge,

Handbreite, Haarbreite, faustgroß, legen reichlich Zeugnis ab, wie man sich über Längenangaben allgemein verständlich zu machen suchte. Bei der sich später notwendig machenden Aufstellung von Maßsystemen bildete die Länge des Fußes das Fußmaß, die Länge des Armes von der Achsel bis zur Spitze des Mittelfingers das sogenannte Ellenmaß. Die Entfernung der Spitzen der Mittelfinger der beiden seitwärts ausgestreckten Arme ist die Klafter. Bei größeren Entfernungen suchte man sich in den bekanntesten Bewegungsvorgängen bequemere Maßeinheiten zu verschaffen. Man mißt nach Schritten, Wegstunden, Tagemärschen, Seereisen, oder auch nach Wurfweite, Schußweite, Hörweite usw. So sind die bei den Gradmessungen des Altertums zugrunde gelegten Entfernungen offenbar nur aus der Anzahl der Tagereisen der Karawanen hervorgegangen, und der in einer Tagereise zurückgelegte Weg wurde wiederum mit dem Stadium, d. i. mit der Länge der Rennbahn, verglichen.

Notwendigkeit von Normalmaßen und die Toise von Châtelet.

Alle diese Maßeinheiten leiden an einem großen Übelstande, nämlich daß sie bis zu einem gewissen Grade unbestimmt sind, und zwar in demselben Grade, wie die einzelnen Individuen einer Rasse voneinander verschieden sind. Künste und Gewerbe verlangten aber schon eine präzisere Festsetzung der Maßeinheiten. Man war gezwungen, einen Repräsentanten herauszugreifen, seine Länge zu fixieren und ihn sorgsam aufzubewahren, wobei man seine Unveränderlichkeit voraussetzt. Wenn nun auch ursprünglich die Maßeinheiten der verschiedenen Völker aus derselben Quelle stammen mögen, so trat doch mit dem Fortschritt der Kultur bei jedem Volke und in jedem Staate die Individualität immer mehr hervor, und man suchte dies auch durch äußerliche Unterschiede zu bekräftigen. So kam es z. B., daß noch bis vor wenig Jahrzehnten jeder Staat seinen besonderen Fuß als Längeneinheit besaß. Man unterschied einen preußischen, badischen, bayerischen, württembergischen, Wiener usw. Fuß, Maße, die zwar nahezu von derselben Länge waren, deren Unterschiede aber doch bei genaueren Messungen nicht unberücksichtigt bleiben durften. Die Bestrebungen, wenigstens in allen Staaten desselben Landes ein einheitliches Maß einzuführen, reichen schon weiter zurück. In England treten sie bereits im 10., in Frankreich im 14. Jahrhundert auf. Besonders war in Frankreich eine Maßeinheit zu größerer Allgemeinheit gelangt, nämlich die Toise. Der Repräsentant ihrer Länge wurde in Paris aufbewahrt und konnte dort jederzeit entnommen werden. Die Aufbewahrung geschah allerdings in einer noch recht primitiven Form. Auf einer an der Mauer des Châtelet befestigten Eisenschiene war durch zwei Vorsprünge die Länge der Toise markiert und konnte durch einfaches Einpassen entnommen werden. Wenn nun auch diese Art und Weise wohl dem täglichen Leben, den Künsten und dem Gewerbe genügte, so entbehrte sie andererseits jeglicher wissenschaftlichen Bedeutung. Dies machte sich um so deutlicher bemerkbar, je weiter sich die geodätischen Arbeiten entwickelten, je mehr sich eine schärfere Definition der Erdgestalt herausbildete, und je mehr man bemüht war, durch möglichst genaue Messungen Aufschluß über die wahre Gestalt der Erde und über die Größe der Abweichungen von einer angenommenen mathematischen

Grundform zu erhalten. Es ist die Aufgabe der exakten Naturwissenschaften, die Erscheinungen in der Natur durch Messungen zahlenmäßig zu verfolgen und aus der Art und Weise, wie sich diese Zahlenverhältnisse im Laufe der Zeit oder bei Abänderung der begleitenden Ursachen verändern, allgemeine Naturgesetze abzuleiten. Hierbei ist es aber Bedingung, daß die zugrunde gelegten Maßeinheiten scharf definiert sind und jeglicher Zweideutigkeit entbehren, daß die Messungen aufs sorgfältigste, so genau es eben die jeweiligen Meßapparate und Maßmethoden gestatten, ausgeführt werden.

Die wissenschaftliche Begründung der Toise du Pérou.

Den ersten Anlaß zu einer präzisen Definition der Länge der Toise gaben die beiden großen Gradmessungsexpeditionen, die zur Untersuchung der Frage, ob die Erde wirklich, wie es die Newtonsche Hypothese verlangte, an den Polen abgeplattet sei, von französischer Seite aus unternommen wurden. Die eine ging im Jahre 1735 unter Leitung von Bouguer und La Condamine nach Peru, die andere ein Jahr später unter Maupertuis nach Lappland. Für beide Expeditionen waren zwei ganz gleiche Maßstäbe von Eisen angefertigt worden. Die Entfernung der Endflächen eines jeden bei einer Temperatur von 13^0R stellte von dieser Zeit an die französische Längeneinheit, die Toise, dar. Der Forderung der Unveränderlichkeit des Maßstabes war dadurch genügt worden, daß man die Ausdehnung des Metalls berücksichtigte und die Länge bei einer bestimmten Temperatur, nämlich 13^0R, als normale Länge festsetzte. Die Unterabteilungen der Toise wurden nach der althergebrachten Duodezimalteilung gebildet. 1 Toise war gleich 6 Pariser Fuß, der Fuß zu 12 Zoll und der Zoll zu 12 Linien gerechnet. Da diese Maßstäbe mit der Toise von Châtelet nicht im Widerspruch standen, so war mit ihrer Einführung weiter keine Änderung im praktischen Leben verbunden.

Der Maßstab der lappländischen Gradmessung wurde auf der Rückreise beschädigt, der andere aber, der für die Messungen am Äquator gedient hatte, sollte für die Folgezeit zu einer großen Bedeutung gelangen. Er ist allgemein bekannt unter dem Namen Toise du Pérou, und die in anderen Ländern seitdem angestellten Gradmessungen beruhen auf der Vergleichung mit dieser Längeneinheit. Die auf diese Einheit gegründeten Messungen werden so lange ihren Wert behalten, als diese Einheit uns erhalten bleibt, sei es nun im Original oder in genauen Kopien oder aber im Zusammenhange mit anderen vorhandenen Maßeinheiten. Sobald dies nicht mehr der Fall ist haben diese Messungen vollständig ihren Wert verloren, da ja dann die damit erzielten Resultate nur das Verhältnis zu einem nicht mehr bekannten Maße ausdrücken. Man sah sich daher veranlaßt, für die Aufbewahrung und Erhaltung dieses Maßstabes die größten Vorsichtsmaßregeln zu treffen.

Die Bestrebungen zur Einführung eines Naturmaßes und das legale Meter.

Die Toise war eine sogenannte willkürliche Maßeinheit, sie stand mit keiner in der Natur vorkommenden Länge in Beziehung, sondern war aus alter Gewohnheit hervorgegangen. Die Französische Revolution, die nach allen Richtungen hin nicht bloß Ordnung schaffen, sondern hauptsächlich reformierend wirken wollte, hatte ihr Augenmerk auch auf das Maß- und

Gewichtswesen gerichtet. Man wollte ein Maßsystem schaffen, das nicht mehr aus nationalen Gewohnheiten hervorging, sondern dem die Idee des Naturmaßes zugrunde lag. Dieses Maßsystem sollte zu einem ganz internationalen werden. Bereits im 17. Jahrhundert war die Idee eines durch die Natur gegebenen Längenmaßes aufgetaucht. Huyghens hatte für physikalische Messungen die Wirkung der Schwerkraft in Betracht gezogen und die Länge des Sekundenpendels als Längeneinheit vorgeschlagen. Diese Frage wurde jetzt wieder näher untersucht; jedoch man entschied sich, das neue Maß den Erddimensionen selbst zu entnehmen. Der zwischen Dünkirchen und Barzelona gelegene Meridian sollte durch eine große Triangulation ganz genau gemessen und daraus die Länge des ganzen Meridians berechnet werden. Als Längeneinheit sollte dann für das neue Maßsystem der zehnmillionste Teil des Erdmeridianquadranten festgesetzt werden, das sogenannte Meter. Die Unterabteilungen und Vielfachen sollten nicht mehr nach dem duodezimalen, sondern nach dem dezimalen Systeme gebildet werden.

So gut der Gedanke auch an und für sich ist, so wird doch der erstrebte Zweck, ein Maß zu besitzen, das wir jederzeit aus der Natur direkt entnehmen können, das uns also niemals verloren gehen kann, nicht erreicht. In der Tat, wir besitzen kein Maß, das uns die Natur unmittelbar liefert, immer müssen wir es uns erst auf experimentellem Wege herstellen, und es wird daher stets von der jeweiligen Messungsgenauigkeit abhängig sein. Die Idee, ein wirkliches Naturmaß besitzen zu können, wird illusorisch. Es ist wohl kaum anzunehmen, daß diese Tatsache Männern wie Condorcet, Lagrange, Laplace, Monge u. a., die in die von der französischen Nationalversammlung eingesetzte Kommission gewählt waren, entgangen ist. Es ist wohl vielmehr anzunehmen, daß sie unter dem Scheine, der Sache der Revolution selbst zu dienen, ihre wissenschaftlichen Forschungen ungestört fortsetzen wollten. Hierfür spricht auch der Umstand, daß man sich bereits mit einem provisorischen Meter begnügte, da der Nationalkonvent nicht lange auf ein Resultat warten wollte. Definitiv abgeschlossen wurde die ganze Angelegenheit erst 1799 und führte zu dem Resultat:

$$1 \text{ Meter} = 443.296 \text{ Par. Linien der Toise du Pérou bei } 13^0 \text{ R.}$$

Man bezeichnet dieses Meter als „legales Meter". Es wurde materiell durch die Länge eines Platinstabes bei 0^0 dargestellt und in dieser Form am 4. Messidor des Jahres VII der Republik dem Staatsarchiv zu Paris übergeben, wodurch es seinen Namen mètre des archives erhalten hat.

Fragt man sich, was durch die Einführung dieses neuen Maßes nun eigentlich erreicht wurde, so muß man sagen, daß an Stelle der ursprünglichen Maßeinheit, der Toise, von jetzt an ein bestimmter Teil derselben als neue Maßeinheit unter dem neuen Namen Meter eingeführt wurde, ohne aber damit zu einem Naturmaß gelangt zu sein; denn dieses Meter ist eben nur definiert durch die Messung des Bogens zwischen Dünkirchen und Barzelona und bleibt insofern eine willkürlich festgesetzte Maßeinheit. Seitdem

waren nun aber die Messungen immer weiter fortgesetzt worden. Bessel fand bei seiner Berechnung der Erddimensionen den Meridianquadranten um 856 Meter größer; ja bei Zugrundelegung der neuesten Ergebnisse ist er sogar etwa 2 km größer. Das gute an dem ganzen Unternehmen war aber die Einführung der dezimalen Teilung und das Bestreben, allen Ländern ein gemeinsames Maß zu verschaffen. Das metrische System bildet jetzt die Grundlage für die Maßsysteme fast aller zivilisierten Völker. Eine Ausnahme macht u. a. England, das noch an seiner alten Einteilung festhält. Man kann wohl sagen, daß durch die Convention du mètre am 20. Mai 1875 die Frage nach einer allgemeinen Längeneinheit entschieden war. Es wurde die Errichtung eines internationalen ständigen Bureaus für Maß und Gewicht mit dem Sitz in Paris festgesetzt, dessen hauptsächlicher Zweck in der Herstellung und Aufbewahrung gemeinsamer Urnormale (internationale Prototype), in der Herstellung ganz genauer Kopien derselben für die einzelnen Staaten (nationale Prototype) und in der Vergleichung aller dieser Normalen untereinander bestehen sollte.

Das internationale Meter.

Im Laufe der Zeit hatte sich ergeben, daß die Wahl des Metalls, das für das mètre des archives verwendet worden war, keine ganz glückliche war. Es stellten sich Unzulänglichkeiten heraus, die bei der Vergleichung mit Kopien störend wirkten. Die Internationale Meterkonvention sah sich daher im Jahre 1889 veranlaßt, das Original durch ein neues Prototyp zu ersetzen. Man stellte nach den bewährtesten Methoden eine Reihe von Maßstäben her, die möglichst genau gleich dem Originale waren. Unter diesen wurde durch Vergleichung der beste und dem Original am nächsten kommende ausgesucht und als internationales Meterprototyp im internationalen Maß- und Gewichtsbureau im Pavillon de Breteuil bei Paris niedergelegt. Dieses als „internationales Meter" bezeichnete Maß war um ein weniges kleiner ausgefallen als das legale Meter. Die genaue Untersuchung ergab

$$1 \text{ Meter legal} = 1.000\,013\,355 \text{ Meter international.}$$

Man hat also den Betrag einer im legalen Metermaße angegebenen Länge mit dem Faktor 1.000 013 355 ($\log = 0.000\,005\,80$) zu multiplizieren, um für dieselbe Länge den entsprechenden Betrag ausgedrückt im internationalen Metermaße zu erhalten. Durch das Reichsgesetz vom 26. April 1893 wurde das internationale Meter im Deutschen Reiche eingeführt.

Bestrebungen zur Einführung der Wellenlänge des Lichts als Längeneinheit.

Das Maß- und Gewichtswesen hat sich in seiner Verwaltung heute zu großer Vollkommenheit entwickelt, es sind eine ganze Reihe guter Kopien des Meters, die mit dem Original verglichen sind, vorhanden. Es steht daher wohl kaum zu befürchten, daß uns diese Längeneinheit verloren gehen könne. Bei der großen Bedeutung dieser Einrichtung ist es aber nicht zu verwundern, daß man unausgesetzt noch auf Mittel sann, die festgesetzte Maßeinheit mit einer in der Natur vorkommenden und als unveränderlich geltenden Länge zu vergleichen, und man richtete sein Augenmerk wieder auf die schon früher, damals jedoch vergeblich in Betracht gezogene Wellenlänge des Lichtes.

Es ist nun in neuerer Zeit dem amerikanischen Physiker A. Michelson bei seinen Versuchen über Interferenz bei hohen Gangunterschieden gelungen, mit Hilfe homogenen Lichtes größere Strecken direkt in Wellenlängen auszumessen. Die Wellenlänge des Lichtes müssen wir aber als ein unveränderliches Naturmaß ansehen, wenigstens hat sich bis jetzt nichts dagegen einwenden lassen; dazu kommt noch, daß dieses Maß verhältnismäßig leicht herzustellen und zu behandeln ist, Eigenschaften, die für den Erdumfang in keiner Weise zutreffen. Die Sache liegt jetzt also so, daß wir das internationale Meter durch die Anzahl der Wellenlängen eines bestimmten homogenen Lichtes ausdrücken und dadurch vor gänzlichem Verlust schützen können. Es ist dies ein Weg, den man wohl schon früher bei den Bestrebungen, ein unveränderliches und stets rekonstruierbares Naturmaß einzuführen, in umgekehrter Weise zur Definition einer praktischen Längeneinheit eingeschlagen hätte, wenn man eben damals bereits in der Lage gewesen wäre, solche kurze Strecken, wie es die Wellenlängen des Lichtes sind, wirklich zu messen.

Die Möglichkeit, die Wellenlänge des Lichtes zu messen, erlangte man zuerst durch den bekannten Fresnelschen Spiegelversuch. Durch Umänderung desselben brachte es nun Michelson dahin, Interferenzen mit hohen Gangunterschieden zu erhalten, und so war es jetzt möglich, auch größere Strecken direkt durch Wellenlängen auszumessen.

Um von diesen Größen einen Begriff zu bekommen, seien hier die Resultate der Messungen Michelsons für die rote, grüne und blaue Kadmiumlinie angeführt. Er fand:

1 Meter = 1553 163.5 Wellenlängen der roten Kadmiumlinie
1 „ = 1966 249.7 „ „ grünen „
1 „ = 2083 372.1 „ „ blauen „

oder umgekehrt:

1 Wellenlänge der roten Kadmiumlinie = 643.847 22 μμ
1 „ „ grünen „ = 508.582 40 „
1 „ „ blauen „ = 479.991 07 „

wo μμ die bekannte Bezeichnung für 0.000 001 mm ist.

Derartige Untersuchungen werden immer noch fortgesetzt. Sieben Jahre, nachdem Michelson zu seinen interessanten Resultaten gelangt war, stellten Perot und Fabry ähnliche Versuche an, verfuhren aber nach einer wesentlich anderen Methode. Hierbei gelangten sie zu Resultaten, die mit denen von Michelson innerhalb 0.1 Wellenlänge, also bis auf 64 μμ übereinstimmten. Dieser Unterschied liegt aber völlig innerhalb der Grenzen der unvermeidlichen Beobachtungsfehler. Man kann daher jetzt die Länge der konventionellen Metereinheit als ein stets rekonstruierbares Maß, das nicht verloren gehen kann, ansehen.

Die ältesten Anschauungen über Ent-

V. Die Entfernung der Gestirne und die Parallaxe. War die Astronomie zu der ersten Gewinnung des Metermaßes aus den Gradmessungen

unumgänglich notwendig, so kann man das jetzt nicht mehr sagen, wo die Maßeinheit entweder durch die metallenen Kopien des internationalen Meters oder gar durch die Wellenlänge des Lichtes definiert ist. Vielmehr treten nunmehr astronomische Arbeiten als notwendiges Bindeglied erst dann ein, wenn dieses kleine, für den Menschen noch handliche Metermaß zur Ausmessung zunächst der Erde selbst, dann aber auch der ganzen himmlischen Erscheinungswelt dienen soll. Man hatte sich wohl im Altertume Begriffe über Sonne, Mond und Planeten gebildet, und es regte sich auch der Wunsch, ihre wahren Größen und Entfernungen kennen zu lernen. Aber man verlor sich hierbei in Spekulationen, und zwar um so mehr, je weiter man noch davon entfernt war, die Mathematik zur Anwendung zu bringen und genaue Messungen anzustellen. Dialektik und Sophistik beherrschten die Wissenschaften. Man war bestrebt, die Erscheinungen in der Natur den aufgestellten Erklärungen anzupassen und nicht umgekehrt. Bei der Aufstellung allgemeiner Philosopheme über das Weltgebäude ließ man den Gedanken freien Lauf und konnte dies um so ungestörter tun, als der Phantasie in dem weiten Himmelsraume durch die Erfahrung noch keine Grenzen gesteckt waren. Namentlich war es die Schule der Pythagoreer, die ihre Vorstellung von der Welt an arithmetische Untersuchungen, an absonderliche Eigenschaften der Zahlen, an die Tonverhältnisse in der Musik und verwandte Dinge knüpfte und eine Harmonie der Sphären schuf. Es waren geistige Spielereien, die jeder Erfahrungsgrundlage entbehrten und daher auch von nicht langem Bestehen sein konnten. fernungen im Weltenraume.

Vor Eintritt der alexandrinischen Schule ist noch an keine wissenschaftliche Astronomie zu denken. Vorstellungen von der Entfernung der Himmelskörper konnte man sich gar nicht machen. Wohl hatte man vermutet, daß Mond und Sonne der Erde näher waren als die Fixsternsphäre, und hatte aus den Beobachtungen von Sonnenfinsternissen geschlossen, daß der Mond der Erde näher sein müsse als die Sonne, jedoch beruhten die Angaben über die Entfernungen nur auf Mutmaßungen, nicht auf Messungen, ja man glaubte, daß sich Sonne und Mond noch innerhalb der Erdatmosphäre befänden. Eine Vermutung trat aber bereits frühzeitig hervor, daß nämlich der weiter entfernte Himmelskörper auch längere Zeit zu einem Umlauf brauche. So findet man bei Plinius in seiner historia naturalis die Meinung geäußert, daß die Sonne zwölfmal weiter als der Mond von der Erde entfernt sein müsse, da sie einen Umlauf erst in der zwölffachen Zeit vollendet. Diese Vermutung, die einem natürlichen Gefühl entsprang, sollte erst etwa zwei Jahrtausende später durch Kepler zu einem festen Gesetz ausgebildet werden, das für die Bestimmung der Entfernungen in unserem Planetensystem von fundamentaler Bedeutung sein sollte. Aber vorläufig bewegte man sich nur in bloßen Mutmaßungen, die sich auf keine Messungen gründeten. Erst als man die Mathematik in den Bereich der Untersuchungen zog, begann man methodisch vorzugehen, man begann zu messen.

Um die Entfernungen der Gestirne zu bestimmen, bedienen sich die Indirekte Bestimmung von

Entfernungen und die Parallaxe.

Astronomen desselben Verfahrens, das von den Geodäten bei terrestrischen Vermessungen angewandt wird. Man wählt eine Grundlinie, deren Länge man durch Messung mit einem Maßstabe so genau als nur möglich ermittelt, und beobachtet von den beiden Endpunkten aus die Richtungen nach dem Objekt, dessen Entfernung bestimmt werden soll. Die Richtungsänderung infolge der Veränderung des Standpunktes des Beobachters wird allgemein als Parallaxe bezeichnet. Sie wird in dem von der gemessenen Grundlinie und dem betrachteten Objekt gebildeten Dreieck durch den Winkel am Objekt dargestellt. Die Parallaxe ist somit nichts anderes als die scheinbare Größe der gegebenen Basis, betrachtet von dem Objekt aus. In dem genannten Dreieck sind nun eine Seite und die beiden anliegenden Winkel bekannt; man kann daher die beiden anderen Seiten, also die Entfernungen des Objektes von den beiden Endpunkten der Basis berechnen. Kennt man die Länge der Basis nicht, so erhält man aus der gemessenen Parallaxe nur das Verhältnis der Entfernungen. Die Bestimmung wird stets um so unsicherer, je größer die Entfernung des Objektes im Vergleich zur Länge der gegebenen Basis, je kleiner also die Parallaxe ist.

Die Parallaxe bei der Bestimmung von Entfernungen der Himmelskörper.

Der Übertragung dieser Methode auf die Bestimmung der Entfernungen der Himmelskörper setzen sich jedoch Schwierigkeiten in den Weg. In dem weiten Himmelsraume handelt es sich immer nur um Entfernungen, die im Verhältnis zu den Grundlinien, die wir zu wählen imstande sind, sehr groß sind. Je nach der benutzten Grundlinie unterscheidet man in der Astronomie eine tägliche und eine jährliche Parallaxe. Bei der täglichen Parallaxe dient der Erdradius als Basis, bei der jährlichen der Radius der Erdbahn. Zur Veranschaulichung der täglichen Parallaxe diene Fig. 5. Denken wir uns die Erde zunächst als Kugel mit dem Radius r, so schneidet die durch den Beobachtungsort B, den Erdmittelpunkt E und den beobachteten Stern S gelegte Ebene die Erdoberfläche in einem Kreise. Ist noch z die Zenitdistanz des Sternes und Δ seine Entfernung vom Erdmittelpunkte, so liefert der Sinussatz der ebenen Trigonometrie im Dreieck EBS sofort die Beziehung

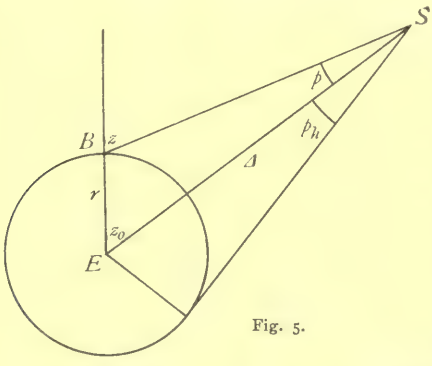


Fig. 5.

$$\sin p = \frac{r}{\Delta} \sin z$$

wo p der Winkel ist, unter dem die Basis r von dem Sterne aus erscheint. Dieser Winkel ist nach obiger Definition die Parallaxe des Sternes S. Ist noch z_0 die geozentrische, am Erdmittelpunkt gemessene Zenitdistanz von S, so ist

$$z = z_0 + p$$

d. h. infolge der täglichen Parallaxe p erscheint die Zenitdistanz des Sternes im Beobachtungsorte um den Betrag p größer als im Erdmittelpunkte, der

Stern scheint tiefer zu stehen, seine Höhe über dem Horizonte ist um den Winkel p vermindert. Man nennt daher p auch die Höhenparallaxe. Wie aus obiger Formel hervorgeht, verschwindet sie für $z = 0$, also im Zenit, dagegen erreicht sie ihren größten Betrag p_h für $z = 90^0$, also im Horizont des Beobachtungsortes. Es ist somit

$$\sin p_h = \frac{r}{\Delta}$$

und diesen Maximalwert p_h nennt man die Horizontalparallaxe. Sie ist nichts anderes als der scheinbare Halbmesser der Erdscheibe für einen auf dem Sterne S befindlichen Beobachter.

Da die Erde keine Kugel, sondern, wie wir sahen, sehr nahe ein Ellipsoid ist, so werden die Verhältnisse in Wirklichkeit etwas weniger einfach. Wählt man als Basis nicht einen beliebigen Erdradius r, sondern den Halbmesser des Erdäquators a, so führt dieser größte Wert p_a der Parallaxe den Namen Äquatorial-Horizontalparallaxe, und man hat also

$$\sin p_a = \frac{a}{\Delta}$$

Aus den bekannten Dimensionen des Erdellipsoids kann man für jeden Erdort den zugehörigen Wert r, also auch p_h aus p_a leicht berechnen. Schreibt man obige Gleichungen in der Form

$$\Delta = \frac{r}{\sin p} \sin z = \frac{r}{\sin p_h} = \frac{a}{\sin p_a}$$

so sieht man, daß durch die Messung der Parallaxe auch sofort die Entfernung Δ des Sternes ermittelt ist. Das ist die große Bedeutung der Parallaxe.

Die frühesten Bestrebungen und die Methode des Aristarch.

Es braucht kaum gesagt zu werden, daß sich die Entfernungsmessung um so schwieriger gestaltet, je kleiner die Parallaxe ist, und so erklärt es sich, daß die historische Entwicklung von der größten Parallaxe, der des Mondes, beginnend zu immer kleineren, der Sonnenparallaxe und den Sternparallaxen, fortschreiten mußte. Die Versuche der Alten, Entfernungen im Raume zu bestimmen, erstrecken sich daher lediglich auf Mond und Sonne.

Daß der Mond uns von allen Himmelskörpern am nächsten ist, erkannte man schon frühzeitig aus verschiedenen Erscheinungen; er war der einzige Himmelskörper, auf dessen großer Scheibe man verschiedenartige hellere und dunklere Gebiete unterscheiden konnte, er bewegte sich weit rascher als alle anderen „Planeten“ der Alten, und endlich sah man ihn vor den Fixsternen, den Planeten und der Sonne vorüberziehen und diese verdecken. Die richtige Deutung der Mondphasen dadurch, daß der Mond sein Licht von der Sonne empfängt, sowie der Sonnen- und Mondfinsternisse waren ebenso früh gesicherte Erfahrungen. Die Finsternisse, die Mondphasen und die Auf- und Untergänge, die einzigen ohne alle Instrumente im Altertum beobachtbaren Erscheinungen, wurden in sinnreicher Weise benutzt, um eine erste rohe Bestimmung der Entfernungen von Mond und Sonne zu erhalten.

Den ersten Versuch, durch Messungen und daran anschließende geometrische Betrachtungen das Verhältnis der Entfernung der Sonne zu der des Mondes zu bestimmen, machte Aristarch von Samos um 280 v. Chr. Er ging von dem völlig richtigen Gedanken aus, daß in dem Dreieck Erde-SonneMond (Fig. 6) der Winkel am Monde dann ein rechter sei, wenn uns die Mondscheibe genau halb erleuchtet erscheint. Gelingt es also, den Augenblick dieser Halbierung, der sogenannten Dichotomie (erstes oder letztes Viertel), genau festzustellen und dann den Winkelabstand des Mondes von der Sonne, den Winkel E, zu messen, so erhält man daraus direkt das Verhältnis der Entfernungen

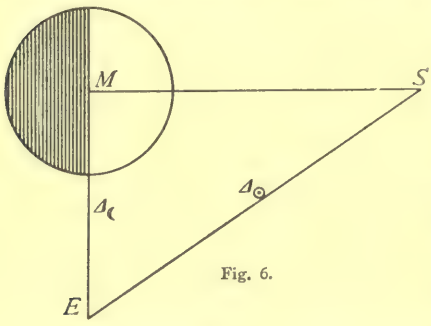


Fig. 6.

$$\frac{\Delta_\odot}{\Delta_\mathfrak{C}} = \frac{1}{\cos E}$$

Aristarch nahm $E = 87^0$ an und folgerte, da damals die trigonometrischen Funktionen noch nicht bekannt waren, auf sehr geschicktem geometrischen Wege, daß obiges Verhältnis zwischen 18 und 20 liegen müsse; in der Tat ist $\sec 87^0 = 19.1$, so daß nach Aristarch die Entfernung der Sonne das 19fache der Entfernung des Mondes betrug. Die Methode war richtig, aber der gefundene Wert noch viel zu klein (19 statt 400), weil sich der Moment der Dichotomie nicht scharf genug beobachten läßt.

Bestimmung der Mondparallaxe durch Hipparch.

Hiermit war der erste Schritt zu einer Bestimmung der Entfernungen der Himmelskörper getan, und wenn er auch zu einem Resultat führte, das noch weit von der Wahrheit entfernt war, so war doch der Anlaß zu weiterer Forschung gegeben. Hipparch, der die große Unsicherheit der Aristarchschen Methode sehr wohl erkannte, suchte deshalb nach einem anderen Wege. Bei seinen Bestrebungen, alle bisher bestehenden astronomischen Ansichten und Bestimmungen gründlich zu prüfen und, was nicht genügend verbürgt erschien, durch neue Beobachtungen zu verbessern, entdeckte er auch die Mondparallaxe. Den Anlaß dazu gaben ihm die Sonnenfinsternisse, von denen er wußte, daß sie an allen Orten in ganz verschiedener Weise in Erscheinung treten. Bei der Verfolgung der Mondbewegung stieß er nämlich auf eine Ungleichheit, die nicht die Bewegung des Mondes in seiner Bahn, sondern nur seine Lage in bezug auf den Horizont des Beobachtungsortes betrifft. Diese Ungleichförmigkeit in der Bewegung wird dadurch hervorgerufen, daß die Erde zur Entfernung des Mondes nicht mehr im Verhältnis eines Punktes steht, d. h. daß man die Horizontalebene des Beobachtungsortes und die dazu parallel durch das Erdzentrum gelegte Ebene nicht mehr als zusammenfallend ansehen darf. Sie bewirkt, daß der Mond die durch den Beobachtungsort gehende Horizontalebene beim Aufgange später, beim Untergange aber früher passiert als die durch das Erdzentrum ge-

legte parallele Ebene, d. h. daß der Aufgang verzögert, der Untergang beschleunigt erscheint. Überhaupt werden infolge der Parallaxe die verschiedenen Zenitdistanzen, wie die Formel S. 202 zeigt, in verschiedener Weise beeinflußt. Beobachtet man daher den Mond in verschiedenen Zenitdistanzen, so läßt sich die Ungleichförmigkeit in der täglichen Bewegung des Mondes und also die Horizontalparallaxe ermitteln.

Den hier skizzierten Weg schlug Hipparch zur Bestimmung der Horizontalparallaxe des Mondes ein. Die Bezeichnung parallaktische Ungleichheit, die man für diese Ungleichförmigkeit der täglichen Bewegung gewählt hat, stammt noch aus der Zeit, da man nur Sphärik trieb, und ist hier nur in diesem Sinne zu verstehen. In neuerer Zeit wird die gleiche Bezeichnung in der Himmelsmechanik für die Störungen des Mondes in seiner Bahn, die von dem wechselnden Verhältnisse zwischen den Entfernungen des Mondes und der Sonne von der Erde, also zwischen den Horizontalparallaxen der Sonne und des Mondes, abhängen, gebraucht.

Hipparchs Versuch zur Bestimmung der Sonnenparallaxe.

Es mag wohl versucht worden sein, in gleicher Weise auch bei der Bestimmung der Parallaxe der Sonne vorzugehen, jedoch mußte dieser Versuch notwendig an der bedeutend größeren Entfernung der Sonne, der eine Parallaxe von etwa neun Bogensekunden entspricht, scheitern. Um diese Größe messen zu können, bedurfte es erst der Entwicklung und Entdeckung ganz neuer Methoden und der Erfindung genauer Meßinstrumente. Aber trotzdem ist bereits von Hipparch ein neuer Versuch zur Bestimmung der Sonnenparallaxe gemacht worden; er gründet sich auf die Beobachtung zentraler Mondfinsternisse. Den Ausgangspunkt bildet ein von ihm bewiesener geometrischer Satz, dem zufolge die Summe der Parallaxen von Sonne und Mond fast gleich ist der Summe der scheinbaren Halbmesser der Sonne und des Schattenkegels der Erde in der Entfernung des Mondes. Den scheinbaren Halbmesser der Sonne nahm Hipparch zu $^1/_4$ Grad an, für die Parallaxe des Mondes setzte er gemäß der Bestimmung von Aristarch das 19fache der Sonnenparallaxe. Den scheinbaren Halbmesser des Schattenkegels der Erde in der Entfernung des Mondes bestimmte er aus der Zeit, die der Mond bei totaler Verfinsterung zu seinem Durchgange durch den Schatten braucht. Diese Zeit beträgt $2^1/_2$ Stunden. Da er nun außerdem noch wußte, daß sich der Mond täglich um $51^m = 765'$ verspätet, so erhielt er aus diesen Daten für den scheinbaren Halbmesser des Erdschattens 40′. Wenn man diese Werte in die obige geometrische Beziehung einführt, so ergibt sich die Parallaxe des Mondes zu $52^1/_4'$, die der Sonne zu $2^3/_4'$. Für den Mond wird also die Parallaxe nahezu richtig erhalten, dagegen ist sie für die Sonne wegen des erwähnten Fehlers der obigen von Aristarch übernommenen Verhältniszahl bei weitem zu groß.

Posidonius' Bestimmungen.

Auch bei Posidonius finden wir ganz ähnliche Messungen auf Grund der Beobachtungen von Sonnenfinsternissen angestellt. Er fand für Sonnen- und Mondparallaxe Werte, die der Wahrheit schon recht nahe kommen; besonders der von ihm gegebene Wert der Sonnenparallaxe von $^1/_4'$ läßt einen

ganz bedeutenden Fortschritt erkennen. Leider wissen wir aber nicht, auf welche Weise er zu diesem Werte gelangt ist, und es läßt sich daher kein Urteil fällen, inwieweit seine Angaben auf wirklichen Beobachtungen beruhen oder nur Vermutungen sind. Eine Frage tritt aber bei ihm zum ersten Male auf: warum Sonne und Mond am Horizont größer erscheinen als in größerer Höhe. Diese Erscheinung, die er den am Horizont lagernden Dünsten zuschreibt, beurteilt er in ganz richtiger Weise als eine Täuschung. Sie hat noch späterhin vielfach zu den verschiedensten Erklärungen Anlaß gegeben. Das wesentliche Moment dabei ist wohl aber rein psychologischer Natur. Wir schätzen die Ausdehnung in vertikaler Richtung geringer als in horizontaler, so daß wir z. B. einen Mast für länger halten, wenn er umgelegt, als wenn er aufgerichtet ist. Hierzu kommt noch der Umstand, daß wir uns im Laufe unserer Entwicklung angeeignet haben, räumlich oder perspektivisch zu sehen, d. h. wir haben die Fähigkeit verloren, die Sehwinkel rein objektiv zu beurteilen, und setzen auf Grund unserer Erfahrungen die scheinbaren Größen ohne weiteres unbewußt in lineare um.

Genauere Bestimmung der Mondparallaxe durch Ptolemäus.

Etwa drei Jahrhunderte später nahm Ptolemäus die Messung der Mondparallaxe wieder auf und suchte sie zu verbessern. Er konstruierte zu diesem Zweck ein besonderes Instrument, das Triquetrum oder parallaktische Lineal, das er im fünften Buche seines Almagest beschreibt. Es entspricht ganz unseren vertikalen Kreisen, nur daß an Stelle des Kreisbogens die Sehne tritt. Es wird also hier die einem beobachteten Winkel entsprechende Sehne gemessen, zu der dann aus der Sehnentafel der zugehörige Winkel entnommen wird. Das Instrument wird vertikal aufgestellt und dient zum direkten Messen von Zenitdistanzen. Auf diese Messungen gründete Ptolemäus seine Bestimmung der Mondparallaxe, indem er geschickt die günstigsten Umstände, nämlich die Zeiten der größten und kleinsten Meridianhöhe des Mondes, benutzte. Die Meridianzenitdistanzen unterscheiden sich dann um $57^0\ 12'$, und diese große Verschiedenheit ist für die Bestimmung der Parallaxe besonders günstig. Ptolemäus fand für die Mondparallaxe den Wert $58'.7$, der nur um $1.'7$ zu groß ist; das ist für die Messungen mit dem primitiven Triquetrum gewiß ein ausgezeichnetes Resultat und ein schöner Beweis für die vortreffliche Beobachtungskunst des Ptolemäus.

Vervollkommnung der Parallaxenbestimmung, moderne Resultate.

Mit diesen Ergebnissen erschienen die Untersuchungen über Entfernungen im Raume auf lange Jahrhunderte hinaus abgeschlossen. Bis ins 17. Jahrhundert finden wir keine neue Methode entstanden. In der Tat hätte auch kein weiterer Fortschritt mehr erreicht werden können, da die Parallaxen aller Himmelskörper mit alleiniger Ausnahme der Mondparallaxe für das unbewaffnete Auge völlig unmerklich sind. Erst mit der Erfindung des Fernrohrs beginnt eine neue Ära in der Geschichte der praktischen Astronomie. Das bewaffnete Auge konnte jetzt der angewandten Vergrößerung entsprechend kleinere Winkelunterschiede wahrnehmen, und mit der Verschärfung des Sehens ging die rasche Vervollkommnung der Meßwerkzeuge und die Ausbildung der Beobachtungsmethoden Hand in Hand. Bisher kannte

man nur absolute Positionsbestimmungen, d. h. man bezog die beobachteten Richtungen immer direkt auf die fundamentalen Richtungen und Ebenen, die durch die Schwerkraft, die Rotationsachse der täglichen Drehung des Himmelsgewölbes und durch die Ebene der scheinbaren Sonnenbahn, die Ekliptik, gegeben sind. Durch die Einführung der mikrometrischen Messungen wurde man jetzt in die Lage gesetzt, die relative Lage zweier nahe in derselben Richtung erscheinenden Himmelskörper zu bestimmen, und hiermit war der Parallaxenbestimmung ein neuer und besserer Weg wie bisher gewiesen, nämlich die Methode der relativen Parallaxen.

Die Bestimmung der Parallaxe setzt immer die Beobachtung desselben Objekts von zwei verschiedenen Standpunkten aus voraus. Es läßt sich dies auf doppelte Weise erreichen. Man vergleicht die Beobachtungen, die von zwei verschiedenen Orten der Erde aus, also von zwei Beobachtern, zu gleicher Zeit gemacht sind, miteinander. Der Unterschied der beiden gleichzeitig beobachteten Richtungen führt zur Kenntnis der Parallaxe, deren Basis zunächst der Abstand der beiden Beobachtungsorte ist. Durch solche gleichzeitige Beobachtungen macht man sich von der eigenen Bewegung des Gestirns frei, man ist also von den Mond- oder Planetentafeln unabhängig, was bei dem zweiten Wege nicht der Fall ist. Dieser gründet sich darauf, daß sich die Erde im Raume bewegt, und daß irgendein Ort der Erde zu verschiedenen Zeiten andere Lagen im Raume einnimmt. Will man auf diese Weise die Parallaxe bestimmen, so muß man die Bewegung der Erde und des Gestirns kennen. Das so erhaltene Resultat ist daher mit den Fehlern der Mond- und Planetentafeln behaftet.

Die Erde führt zunächst zwei Bewegungen aus, die den Ort des Beobachters im Raume fortwährend ändern: eine tägliche Bewegung um die Erdachse und eine jährliche Bewegung um die Sonne. Die tägliche Bewegung geht vollkommen gleichförmig vor sich, und diese Gleichförmigkeit erkennen wir an der scheinbaren täglichen Bewegung der Fixsterne, zu deren Sphäre, wie die griechischen Astronomen sagten, die Erde im Verhältnis eines Punktes steht. Ist das Gestirn uns aber nahe genug, wie der Mond, so erscheint seine tägliche Bewegung gegenüber den Fixsternen durch die tägliche Parallaxe verändert. Diese Erscheinung mußte bei der großen Nähe des Mondes den Alten bereits auffallen, und wir haben gesehen, wie Ptolemäus seine Parallaxenbestimmungen mittels Messung von Zenitdistanzen ausführte. Diese Messungen wurden aber noch durch die Refraktion und durch ungenügende Kenntnis der Mondbewegung beeinflußt, Fehler, die Ptolemäus noch nicht vermeiden konnte.

Die moderne Astronomie beherrscht aber alle diese Einflüsse in hohem Maße und hat zu den genannten beiden Beobachtungsmethoden noch eine ganze Reihe anderer hinzugefügt, so daß uns jetzt die Mondparallaxe sehr genau bekannt ist. Sie beträgt nach Hansen in der mittleren Entfernung des Mondes

$$p_{\mathbb{C}} = 57' 2''.27$$

woraus sich als mittlere Entfernung des Mondes

$$\Delta_{\mathfrak{C}} = 60.2741\, a = 384452 \text{ km}$$

ergibt. Da ferner in der mittleren Entfernung der scheinbare Halbmesser des Mondes $15' 32''.59$ beträgt, so ergibt sich für die Mondkugel ein Durchmesser von 3476 km, d. i. etwa ein Viertel des Erddurchmessers.

Die Bedeutung der Parallaxe für die Erkenntnis der Ausdehnungen im Weltenraum.

War, wie wir sahen, namentlich durch die Messung des Ptolemäus die Entfernung des Mondes schon ziemlich genau bekannt geworden, so herrschte doch über die Entfernung der Sonne noch bis zum Ausgang des Mittelalters völlige Unklarheit. Sowohl die Dichotomiebeobachtung des Aristarch als auch die Finsternisrechnung des Hipparch hatte auf eine Sonnenparallaxe von $3'$ geführt, und dieser Wert behielt daher über ein Jahrtausend lang seine Geltung. Bevor dieser durch den richtigen Wert von etwa $8''.8$ ersetzt, also die Sonnenentfernung von 1200 auf 24000 Erdradien hinausgerückt werden konnte, mußten einerseits die Beobachtungshilfsmittel durch die Erfindung des Fernrohrs (1608) wesentlich verschärft, andererseits neue theoretische Grundlagen der Planetenbewegung geschaffen werden. Gerade dieser letztere wichtige Fortschritt, die Entdeckung der Keplerschen Gesetze, ging nun wieder aus einer konsequenten und umfassenden Untersuchung des Einflusses der Parallaxe auf die scheinbaren Örter der Planeten am Himmel hervor — jedoch nicht der täglichen, sondern der jährlichen Parallaxe.

Erst nach der Annahme des Kopernikanischen Weltsystems konnte von einer jährlichen Parallaxe die Rede sein. Die Erde beschrieb nun um die Sonne eine ausgedehnte Bahn, von deren verschiedenen Punkten aus gesehen namentlich die Planeten sehr große parallaktische Verschiebungen erleiden mußten. Gerade diese Verschiebungen waren es, die den scheinbaren Lauf der Planeten am Himmel so kompliziert gestalteten und im Altertum zu der Epizykelntheorie den Anlaß gegeben hatten. Im nächsten Kapitel werden wir sehen, wie Kepler unter Benutzung der vortrefflichen Marsbeobachtungen Tycho Brahes die parallaktischen Verschiebungen dieses Planeten ermittelte und durch eine rein geometrische Berechnung der ganzen Marsbahn zu seinen bekannten Gesetzen gelangte, die in einer vorher ungeahnten Weise zur Ausmessung des ganzen Planetensystems und zur Erweiterung des Raumbegriffes beitragen sollten. Erst später wird daher von der genauen Bestimmung der Sonnenparallaxe und den planetarischen Entfernungen die Rede sein.

Auch die Fixsterne mußten nach der Kopernikanischen Lehre durch die jährliche Bewegung der Erde parallaktische Verschiebungen erleiden, und daß man solche auf keine Art nachweisen konnte, ist lange Zeit als ein gewichtiger Einwand gegen das neue Weltsystem erhoben worden. Nahm man aber, was ja für jeden Einsichtigen bald unabweisbar war, dieses System an, so mußten mit jeder Verfeinerung der Beobachtungen die Sternparallaxen kleiner und kleiner angenommen werden, um in den Bereich der Unmerkbarkeit zu rücken: jede Verschärfung der astronomischen Messungen schob die Grenzen des vom Menschengeiste umfaßten Raumes weiter und weiter hinaus. Auch darüber wird später noch eingehend zu berichten sein.

Literatur.

1. Allgemeine Angaben betreffend die Geschichte der Astronomie.

Will man sich von der allmählichen Entwicklung der astronomischen Weltanschauung, von der sich nach und nach vertiefenden Auffassung der uns unter dem Inbegriff des Himmels erscheinenden Außenwelt und von der Bedeutung, die dabei unser Standpunkt auf der Erde und die Erde selbst als Ganzes hat, ein Bild verschaffen, so muß man die Geschichte der Astronomie näher verfolgen. Man wird dann oft finden, daß selbst unseren ganz modernen Forschungen ein Gedankengang zugrunde liegt, der ebenso alt ist wie die Wissenschaft selbst, nur daß es früher an Mitteln und Wegen zu einer praktischen Durchführung fehlte. Erst hierdurch wird es möglich, unsern gegenwärtigen Kulturzustand in der richtigen Weise zu verstehen, abhängig von dem Wandel menschlicher Erkenntnis.

Von den Werken, die die Geschichte der Astronomie im allgemeinen behandeln, seien hier als hauptsächlichste erwähnt:

Bailly, Jean Sylvain, Histoire de l'Astronomie ancienne depuis son origine jusqu'à l'établissement de l'École d'Alexandrie. Seconde édition. Paris, 1781.

—, Histoire de l'Astronomie moderne depuis la fondation de l'École d'Alexandrie jusqu'à l'époque de 1781. Nouv. édition. 3 Vol. Paris, 1785.

—, Traité de l'Astronomie indienne et orientale, ouvrage qui peut servir de suite à l'Histoire de l'Astronomie ancienne. Paris, 1787.

Delambre, Jean Baptiste Joseph, Histoire de l'Astronomie ancienne. 2 Vol. Paris, 1817.

—, Histoire de l'Astronomie du moyen âge. Paris, 1819.

—, Histoire de l'Astronomie moderne. 2 Vol. Paris, 1821.

—, Histoire de l'Astronomie au dix-huitième siècle, publiée par C. L. Mathieu. Paris, 1827.

Diese Reihe wird noch vervollständigt durch ein erst kürzlich herausgegebenes Werk Delambres, das als eine Geschichte der Erdmessung gedacht war:

—, Grandeur et Figure de la Terre. Ouvrage augmenté de notes, de cartes, et publié par les soins de G. Bigourdan. Paris, 1912.

Mädler, Joh. Heinrich v., Geschichte der Himmelskunde von der ältesten bis auf die neueste Zeit. 2 Bde. Braunschweig, 1873.

Wolf, Rudolf, Geschichte der Astronomie. München, 1877.

Von mehr speziellem Charakter sind das die Zeit Keplers behandelnde und in vorzüglicher Weise dargestellte Werk:

Apelt, E. F., Die Reformation der Sternkunde. Ein Beitrag zur deutschen Kulturgeschichte. Jena, 1852,

ferner das mehr auf eine Philosophie der Wissenschaften hinzielende Werk:

Whewell, William, Geschichte der inductiven Wissenschaften von der frühesten bis zu unserer Zeit. Nach dem Englischen mit Anmerkungen von J. J. v. Littrow. 3 Teile. Stuttgart, 1840—41.

Für die Zeit des klassischen Altertums namentlich kommen in Betracht als allgemeine Werke:

Heiberg, J. L., Naturwissenschaften und Mathematik im klassischen Altertum. Leipzig, 1912.

Hoppe, Edmund, Mathematik und Astronomie im klassischen Altertum. Heidelberg, 1911.

Sartorius, Max, Die Entwicklung der Astronomie bei den Griechen bis Anaxagoras und Empedokles, im besonderen Anschluß an Theophrast. Inauguraldissertation. Halle, 1883.

Schaubach, Joh. Konrad, Geschichte der griechischen Astronomie bis auf Eratosthenes. Göttingen, 1802.

und insbesondere die astronomische Geographie berücksichtigend:

ÖTTINGER, LUDW., Die Vorstellungen der alten Griechen und Römer über die Erde als Himmelskörper. Freiburg, 1850.

SCHAEFER, H. W., Die astronomische Geographie der Griechen bis auf Eratosthenes. Progr. Flensburg, 1873.

Die Entwicklung der mathematischen Geographie behandelt in eingehender Weise und unter Angabe einer reichhaltigen Literatur das Werk:

GÜNTHER, SIEGMUND, Handbuch der mathematischen Geographie. Stuttgart, 1890.

Auch mag hier noch der Abhandlung:

RITTER, FR. CARL REINH., Über den Begriff des Horizontes, insbesondere des geographischen oder natürlichen, und dessen geschichtliche Entwicklung. Progr. Marburg, 1857

gedacht werden.

2. Besondere Angaben zu den einzelnen Abschnitten.

Zu Abschnitt I.

S. 177. In einer seiner populären Vorlesungen sagt der unsterbliche BESSEL, daß man nach den Graden der Fortschritte im Verstehen des Buches der Natur in der bisherigen Geschichte des Menschengeschlechtes vier Perioden unterscheiden kann. Die erste liegt vor der Sintflut, in ihr lernt das Menschengeschlecht das Gehen und treibt Kinderspiele, ohne sich weiter um das Buch der Natur zu kümmern. Die zweite Periode umfaßt die Psalmen DAVIDS und die Gesänge HOMERS, in ihr lernt man seine Buchstaben kennen, ohne einen Zusammenhang zu ahnen. Die dritte Periode beginnt nach HOMER, es ist die des Buchstabierens. Die vierte Periode endlich ist die des Lesens, sie beginnt mit NEWTON.

Über den Zustand der Himmelskunde in den beiden ersten Perioden läßt sich nur wenig berichten, mit der dritten beginnt aber ihre Entwicklung als Wissenschaft. Alle menschliche Erkenntnis fängt mit dem Augenschein an, und so finden wir auch hier zunächst das Bestreben, alle Vorgänge im Weltall so zu deuten, wie sie uns erscheinen. Der nächste Schritt besteht in der Erkenntnis der Vorgänge, wie sie tatsächlich sind. Endlich, und hier setzt die vierte Periode ein, sucht man nach allgemeinen Gesetzen, die als Ursache aller Vorgänge angesehen werden können. Drei große Fragen an die Natur sind es, die im Laufe der dritten und vierten Periode nacheinander beantwortet werden, nämlich: wie erscheint es, wie ist es, und warum ist es so? Hierdurch wird in natürlicher Weise Form und Inhalt des ursprünglichen Lehrgebäudes der Astronomie bestimmt, das sich in einen sphärischen, einen theorischen und einen physischen Teil gliedert, und wir finden diese Dreiteilung in der Geschichte der Astronomie dokumentiert durch die klassischen Werke von PTOLEMAEUS, KOPERNIKUS, KEPLER und NEWTON. Durch die Anwendung der Photographie und Spektralanalyse auf die Himmelskörper ist seit etwa Mitte des vorigen Jahrhunderts ein ganz neuer Zweig, die Astrophysik, hinzugetreten, die, so abgesondert sie auch durch ihre Aufgabe, die physikalische Beschaffenheit der Himmelskörper zu studieren, dazustehen scheint, doch auch neue Gesichtspunkte über die Bewegungen und Entfernungen im Raume eröffnet und eine wesentliche Ergänzung der eigentlichen Astronomie bildet.

S. 178. Die μεγάλη σύνταξις des CLAUDIUS PTOLEMAEUS scheint gegen 160 n. Chr. beendet worden zu sein. Durch die Übersetzung der Araber erhalten geblieben, erschien sie zuerst 1538 aus der Baseler Druckerei von JOHANNES WALDER (Valderus). Diese editio princeps wurde von SIMON GRYNAEUS besorgt. 1813—16 erschien eine französische Ausgabe durch den Abbé NICOLAS HALMA; sie fand besonders wegen der von DELAMBRE gegebenen Anmerkungen bei den Astronomen große Anerkennung, obwohl sie vom Standpunkte des Philologen nicht einwandfrei ist. 1898 und 1903 wurde durch J. L. HEIBERG eine Ausgabe besorgt, die ganz und gar der modernen Textkritik entspricht und durch die Übersetzung von KARL MANITIUS (Leipzig, 1912) der Allgemeinheit zugänglich gemacht wurde. Eingereiht ist diese Ausgabe in die Bibliotheca scriptorum Graecorum et Romanorum Teubneriana.

Im Almagest finden wir die Grundlagen der ebenen wie sphärischen Trigonometrie vollständig entwickelt, wenn auch noch nicht in der uns gebräuchlichen Form. Das Werk

enthält somit die einzige Trigonometrie des Altertums. Eine Darstellung derselben gibt Fr. W. Wilberg in seinen beiden Programmabhandlungen: Die Trigonometrie der Griechen, aus dem Almagest des Ptolemäus dargestellt (Essen, 1838/39).

Wie M. Chasles in seiner Geschichte der Geometrie (deutsch von Sohncke. Halle, 1839) angibt, gebührt Apollonius der Ruhm, die Geometrie auf die Astronomie angewandt zu haben, da man ihm die Theorie der Epizykel zuschreibt.

Eine deutsche Ausgabe der De revolutionibus orbium coelestium libri VI des Nik. Koppernikus wurde von C. L. Menzzer und Dr. M. Cantor (Thorn, 1879) besorgt.

S. 179. Eine Gesamtausgabe der Werke Keplers besorgte Ch. Frisch in 8 Bänden (Frankfurt a. M., 1858—71). Im Vol. III ist die Astronomia nova, im Vol. V die Harmonia mundi wiedergegeben.

S. 180. Newtons Prinzipien wurden erst durch die mannigfachen, mit Anmerkungen versehenen Ausgaben und Übersetzungen zugänglicher. Die von Newton selbst noch besorgte editio ultima erschien 1723 zu Amsterdam. Die von Th. Le Seur und F. Jacquier besorgte erste Genfer Ausgabe erschien 1739—42 in 3 Bänden. Eine deutsche Ausgabe besorgte J. P. Wolfers (Berlin, 1872).

Zu Abschnitt II.

S. 181. Über die Vorstellungen von der Welt im Alten Testament entwirft G. Schiaparelli ein anschauliches Bild in: Die Astronomie im Alten Testament, übersetzt von W. Luedtke (Gießen, 1904).

S. 182. Alexanders des Grossen Zug war, wie sich A. v. Humboldt (Kosmos II) ausdrückt, eine wissenschaftliche Expedition im eigentlichsten Sinne des Wortes.

Über die Anschauung des Thales berichtet uns Seneca in Naturalium quaestionum libri VII.

S. 183. Aristoteles gibt eine Zusammenstellung der bisherigen Ansichten über die Gestalt der Erde in De coelo libri IV.

Die Äußerung Platos findet man in seinem: Timaeus Locrus oder Weltall und Weltseele.

Die Anschauungen des Parmenides und Empedokles entwickelt E. F. Apelt in seiner Schrift: Parmenidis et Empedoclis doctrina de mundi structura (Jena, 1857).

Die Schrift des Archimedes περὶ τῶν ὀχουμένων ist nicht im Urtext vorhanden. Von F. Commandinus wurde sie ins Lateinische übersetzt (vgl. A. G. Kästner, Geschichte der Mathematik II); eine deutsche Übersetzung gab Nizze heraus (Stralsund, 1824).

S. 184. Kleomedes Ansichten und Erwägungen finden wir in seiner κυκλικὴ θεωρία μετεώρων zusammengestellt.

S. 185. Über die Entwicklung der Lehre von der Kugelgestalt der Erde im Mittelalter entwerfen die beiden Schriften von Siegm. Günther: Studien zur Geschichte der mathematischen und physikalischen Geographie. 1. Heft: Die Lehre von der Erdrundung und Erdbewegung im Mittelalter bei den Occidentalen (Halle a. S., 1877). 2. Heft: Die Lehre von der Erdrundung und Erdbewegung im Mittelalter bei den Arabern und Hebräern (Halle a. S., 1877) ein reichhaltiges Bild.

S. 186. Joh. de Sacrobosco (auch Sacrobusto) hatte gegen Ende des 13. Jahrhunderts eine Sphaera mundi verfaßt. Sie stellt Auszüge aus den Werken von Ptolemaeus, Alfraganus, Albategnius u. a. zusammen, ohne etwas Neues zu geben. Damit war aber ein leicht verständliches und den geringen Anforderungen der damaligen Zeit vollauf genügendes Lehrbuch geschaffen. Diesem Umstande hatte das Buch auch nur sein Ansehen zu verdanken, ein Ansehen, das so weit ging, daß jeder, der sich berufen fühlte, über Astronomie zu schreiben, den Namen Sacrobosco an die Spitze seines Werkes setzen zu müssen glaubte. Die Sphaera mundi war eines der ersten astronomischen Werke, das durch Druck vervielfältigt wurde; 1472 wurde es durch Andreas Gallus zu Ferrara besorgt.

Zu Abschnitt III.

S. 186. Aristoteles berichtet in seinem bekannten Werk De coelo, daß die Mathematiker den Erdumfang zu 40 Myriaden Stadien annehmen; hiermit kann er aber wohl nur griechische Mathematiker meinen und nicht, wie Bailly annimmt, Völker einer noch weiter zurückliegenden Zeit.

In seiner Sandrechnung (Arenarius, Ψαμμίτης) gibt ARCHIMEDES an, daß manche den Erdumfang zu 30 Myriaden Stadien annehmen, womit er wohl Angaben von ARISTARCHOS und EUDOXOS meint.

KLEOMEDES ist der einzige Schriftsteller, der uns über die Arbeiten des ERATOSTHENES und POSIDONIUS in seiner κυκλικὴ θεωρία μετεώρων berichtet.

Über das Skaphium des ARISTARCH berichtet uns VITRUVIUS. Der Schatten des Gnomon fiel hier nicht auf eine horizontale Fläche, sondern auf die Innenseite einer um den Gnomon als Radius geschlagenen Kugelfläche. Man las hier also direkt die Größe des Bogens, nicht die Tangente des Bogens ab.

S. 187. Wieweit die alten Messungen mit der Wirklichkeit übereinstimmen, läßt sich nicht nachweisen, da wir die Länge des Stadiums nicht sicher kennen. Auch gab es verschiedene Arten von Stadien, so daß wir auch noch in diesem Punkte im ungewissen sind. LEPSIUS will zwar in seiner Abhandlung: Das Stadium und die Gradmessung des Eratosthenes auf Grundlage der ägyptischen Maße (Zeitschr. f. ägyptische Sprache und Altertumskunde, 15. Jahrg.) das sogenannte ägyptische Stadium ziemlich sicher bestimmt haben und unter Berücksichtigung der verschiedenen Fehlerquellen die Messung des ERATOSTHENES bis auf 14% richtig halten, allein es ist dies doch sehr schwer zu entscheiden, da man sich eben wegen der Willkürlichkeit des Maßstabes leicht zu Trugschlüssen verleiten läßt. Man kann nur sagen, daß die Größenordnung sicher gestellt war.

Die Annahmen in den geographischen Positionen der Orte waren noch recht mangelhaft; besonders was die geographische Länge anlangte, mußte man sich auf bloße Schätzungen beschränken, so daß die ersten Versuche, die Erde durch Karten darzustellen, noch sehr der Willkür unterworfen waren. Über diese Versuche gibt uns FR. WILBERG in seiner Programmabhandlung: Das Netz der allgemeinen Karten des Eratosthenes und Ptolemaeus (Essen, 1834) ein anschauliches Bild.

Die Gradmessungen des Altertums sowie die Meinungen der Alten über die Größe der Erde findet man eingehender erörtert in der Programmabhandlung von WILL. ABENDROTH: Darstellung und Kritik der ältesten Gradmessungen (Dresden, 1866) und in der Inauguraldissertation von JOHN CHRIST. LOW: De iis, quae veteres philosophi de magnitudine telluris memoriae prodiderunt (Lugduni Batavorum, 1808).

S. 188. Über die arabische Messung berichtet uns ALFRAGANI rudimenta astronomiae et ALBATEGNII liber de motu stellarum, ex observationibus tum propriis tum PTOLEMAEI; cum JO. DE REGIOMONTE oratione introductoria, demonstrationibus geometricis et additionibus. Beide Werke wurden 1537 zu Nürnberg von MELANCHTHON herausgegeben.

Das eigenartige Messungsverfahren FERNELS, das trotz seines rohen Apparates zu einem verhältnismäßig guten Resultat führte, findet man in seiner: Cosmotheria seu de forma mundi et de corporibus coelestibus libri duo (Paris, 1528) beschrieben.

Die bahnbrechende Vermessungsarbeit des SNELLIUS, die Methode der Triangulation, ist in seinem Werke: Eratosthenes Batavus seu de terrae ambitus vera quantitate suscitatus (Leiden, 1617) eingehend beschrieben. Die nach gleichem Muster ausgeführte Gradmessung PICARDS wurde unter dem Titel: La mesure de la Terre (Paris, 1671) herausgegeben.

S. 189. Das Ergebnis der Gradmessung, die als Erweiterung der PICARDschen Messung zur Entscheidung der Frage der Abplattung dienen sollte, gibt JACQUES CASSINI (CASSINI II.) in seinem Traité de la grandeur et de la figure de la Terre (Paris, 1720).

S. 190. Die für die Frage der Abplattung entscheidenden Messungen in Peru und Lappland sind hauptsächlich durch die Werke: BOUGUER, La figure de la Terre (Paris, 1749); DE LA CONDAMINE, Mesure des trois premiers degrés du méridien dans l'hémisphère australe (Paris, 1751) und MAUPERTUIS, La figure de la Terre (Paris, 1738) in die Öffentlichkeit gelangt.

S. 191. WALBECK war der erste, der die Methode der kleinsten Quadrate auf die Kombination mehrerer Gradmessungen anwandte. In seiner Dissertatio de forma et magnitudine telluris ex dimensionibus arcus meridiani dimetiendis (Åbo, 1819) legt er der Berechnung der Erddimensionen sechs Breitengradmessungen zugrunde. BESSEL hat seine berühmte Aus-

gleichung in den Astronom. Nachrichten Bd. 14 gegeben mit einer nachträglichen Korrektur in Bd. 19.

Für die Entwicklung der Erdmessung möge hier noch auf die folgenden Aufsätze hingewiesen werden: F. W. BESSEL, Über das, was uns die Astronomie von der Gestalt und dem Inneren der Erde lehrt (Nr. 2 der Populären Vorlesungen über wissenschaftliche Gegenstände. Herausgegeben von H. C. SCHUMACHER, Hamburg, 1848); L. POSCH, Geschichte und System der Breitengradmessungen. Eine Inauguraldissertation (Freysing, 1860); A. NAGEL, Die Hauptmomente der Entwicklungsgeschichte der Gradmessungen (Dresden, 1873); ERNST MAYER, Über die Gestalt und Größe der Erde. Eine historisch-geodätische Studie (Fiume, 1876).

Die Bezeichnung Geoid hat LISTING zuerst in einer kleinen Abhandlung: Über unsere jetzige Kenntnis der Gestalt und Größe der Erde (Göttingen, 1872) gegeben. Die Definition des Geoids wurde aber bereits klar und deutlich von C. F. GAUSS in seiner: Bestimmung des Breitenunterschiedes zwischen den Sternwarten von Göttingen und Altona durch Beobachtungen am Ramsdenschen Zenithsector (Göttingen, 1828) und von BESSEL in Astronom. Nachr. Bd. 14 aufgestellt. In seiner Abhandlung: Die Figur der Erde. Ein Beitrag zur europäischen Gradmessung (Publikation des Kgl. Preuß. Geodätischen Institutes. Berlin, 1878) macht H. BRUNS einige Einschränkungen und gibt eine schärfere Fassung der Aufgabe der Geodäsie. Als Fortsetzung seiner obengenannten Abhandlung gab LISTING noch die folgende: Neue geometrische und dynamische Konstanten des Erdkörpers (Göttingen, 1878) heraus, wo er die auf physikalischem Wege ermittelten Konstanten, nämlich Schwerkraft und Länge des Sekundenpendels, als dynamische bezeichnet.

S. 192. Die erste in Deutschland ausgeführte Bestimmung der Längendifferenz mit Hilfe des elektrischen Telegraphen fand 1858 zwischen Altona und Schwerin statt; vgl. C. A. F. PETERS, Über die Bestimmung des Längenunterschiedes zwischen Altona und Schwerin, ausgeführt im Jahre 1858 durch galvanische Signale (Altona, 1861).

Der Entwurf zu einer mitteleuropäischen Gradmessung ist von J. J. BAEYER in seiner Schrift: Über die Größe und Figur der Erde. Eine Denkschrift zur Begründung einer mitteleuropäischen Gradmessung nebst einer Übersichtskarte (Berlin, 1861) niedergelegt. Über den Fortgang der Arbeiten in allen Ländern geben die Verhandlungen und Publikationen der Internationalen Erdmessung laufenden Bericht.

S. 193. Eine treffliche Darstellung der Begriffe Geoid und Erdellipsoid sowie der Grundlagen zu ihrer Bestimmung geben die beiden Schriften: A. BÖRSCH, Die Grundlagen der Bestimmung der Erdgestalt (Leipzig, 1905) und F. R. HELMERT, Geoid und Erdellipsoid. Vortrag gehalten am 16. Dez. 1912 (Berlin, 1913). Eine ausführliche Übersicht aller Bestrebungen, Figur und Größe der Erde zu bestimmen, und deren Resultate gibt G. PERRIER, La figure de la Terre. Revue de Géographie annuelle. Tome II (Paris, 1908) sowie die bereits anfangs erwähnte Geschichte der Erdmessung von DELAMBRE.

S. 194. Betreffs der neuesten Bestimmungen der Erddimensionen vgl. F. R. HELMERT, Die Größe der Erde. 1. Mittheil. (Sitzungsber. d. Kgl. Preuß. Akademie der Wiss. Physikal.-math. Classe. Berlin, 1906) und JOHN F. HAYFORD, The Figure of the Earth and Isostasy from Measurements in the United States (Washington, 1909) nebst der Ergänzung: Supplementary Investigations in 1909 of the Figure of the Earth and Isostasy (Washington, 1910).

Zu Abschnitt IV.

S. 194. Einen allgemeinen Überblick über die Entstehung der Maße und Maßsysteme und über die Bestrebungen, sie zu regulieren und zu verwalten, geben: F. W. BESSEL, Über Maß und Gewicht im allgemeinen und das Preußische Längenmaß im besonderen (Nr. 8 der Populären Vorlesungen über wissenschaftliche Gegenstände. Herausgegeben von H. C. SCHUMACHER. Hamburg, 1848); C. A. NAGEL, Über Urmaaße und Maaßsysteme. Vortrag (Dresden, 1858); W. FOERSTER, Gemeinsames Maaß und Gewicht und der Pariser Vertrag vom 20. Mai 1875 (Nr. 2 der Sammlung von Vorträgen und Abhandlungen, 2. Folge. Berlin, 1887); W. BLOCK, Maße und Messen (Leipzig, 1913).

Über die im Altertum angewandten Maße und über Versuche, sie mit neueren Maßen zu vergleichen, ist viel geschrieben worden. Hier seien nur folgende Arbeiten erwähnt:

G. GROSSE, Metrologische Tafeln über die alten Maaße, Gewichte und Münzen Roms und Griechenlands, nebst dem Verhältniß derselben gegen bekannte französische und deutsche, zur Erklärung alter Schriftsteller, nach Hrn. ROME DE L'ISLE. Mit einigen Berichtigungen von Herrn Hofrath KÄSTNER (Braunschweig, 1792); L. IDELER, Über die Längen- und Flächenmaße der Alten. 3 Teile (Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, hist.-philolog. Klasse. Berlin, 1813/27); JOH. FR. WURM, De ponderum, nummorum, mensurarum, ac de anni ordinandi rationibus apud Romanos et Graecos (Stutgardiae, 1821); L. FENNER VON FENNEBERG, Untersuchungen über die Längen-, Feld- und Wegemaaße der Völker des Alterthums, insbesondere der Griechen und der Juden (Berlin, 1859); F. HULTSCH, Griechische und römische Metrologie (Berlin, 1862); R. LEPSIUS, Die Längenmaße der Alten (Berlin, 1884).

S. 198. Die berühmte Gradmessung zwischen Dünkirchen und Barzelona und die Begrün dung des metrischen Systems behandelt das Werk: Base du système métrique décimal, ou mesure de l'arc du méridien compris entre les parallèles de Dunkerque et Barcelone, exécutée en 1792 et années suivantes, par MM. MÉCHAIN et DELAMBRE, rédigée par M. DELAMBRE, 3 Tomes (Paris, 1806—10). Eine teilweise Übersetzung ist in letzter Zeit von W. BLOCK (Ostwalds Klassiker Nr. 181. Leipzig, 1911) herausgegeben worden. Ferner sei hier noch erwähnt: FRED. A. P. BARNARD, The metric system of weigths and measures. Revised edition (New-York, 1872); G. BIGOURDAN, Le système métrique des poids et mesures (Paris, 1901).

S. 199. Das Internationale Maß- und Gewichtsbureau in Paris gibt Berichte und Abhandlungen über seine fortlaufenden Arbeiten heraus. Von den Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures publiées sous l'autorité du Comité international, par le directeur du Bureau erschien Tome I 1881 zu Paris.

Durch Gesetz vom 17. August 1868 wurde vom Norddeutschen Bunde das metrische System in Deutschland eingeführt. Organisation und Verwaltung des ganzen Maß- und Gewichtswesens unterstehen der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission, deren Veröffentlichungen ursprünglich unter dem Titel: „Metronomische Beiträge" herausgegeben wurden. Von den 7 Heften, die zu Berlin 1870—90 erschienen, ist besonders Heft 5 bemerkenswert: Zur Geschichte und Kritik der Toisen-Maaß-Stäbe. Ein Beitrag zur definitiven Einordnung der auf das altfranzösische System begründeten Messungen in das metrische System. Von C. F. W. PETERS (Berlin, 1885). Die „Beiträge" werden noch jetzt unter dem Titel: „Wissenschaftliche Abhandlungen" fortgesetzt.

Für die Vergleichung der verschiedenen Normalmaße untereinander kommen hauptsächlich in Betracht: H. W. DOVE, Über Maaß und Messen oder Darstellung der bei Zeit-, Raum- und Gewichtsbestimmungen üblichen Maaße, Meßinstrumente und Meßmethoden, nebst Reductionstafeln. 2. Aufl. (Berlin 1835); F. W. BESSEL, Darstellung der Untersuchungen und Maaßregeln, welche, in den Jahren 1835 bis 1838, durch die Einheit des Preußischen Längenmaaßes veranlaßt worden sind (Berlin, 1839); H. JAMES, Comparisons of the Standards of Length of England, France, Belgium, Prussia, Russia, India, Australia, made at the Ordnance Survey Office, Southampton, by Captain A. CLARKE. Vol. I (London, 1866); Maßvergleichungen. Herausgegeben von dem Centralbureau der Europäischen Gradmessung (unter J. J. BAEYER). 2 Hefte (Publikat. des Kgl. Preuß. Geodätischen Instituts. Berlin, 1872—76); F. R. HELMERT, Die Europäische Längengradmessung in 52 Grad Breite von Greenwich bis Warschau. 1. Heft: Hauptdreiecke und Grundlinienanschlüsse von England bis Polen (Berlin, 1893). (Veröffentl. des Kgl. Preuß. Geodät. Instituts und Centralbureaus der Internat. Erdmessung.) Hier kommt namentlich das 4. Kapitel in Betracht, das die Grundlinien und ihre Anschlüsse an das Hauptnetz behandelt. In Band XII der Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures (Paris, 1902) gibt J. RENÉ BENOÎT eine Détermination du rapport du Yard au Mètre. England hält noch jetzt an seiner alten Maßeinheit, dem Yard, und an der Duodezimalteilung fest. 1 Yard ist gleich 3 engl. Fuß, der Fuß zu 12 Zoll gerechnet. Für die Beziehung des englischen Fußes zu dem Meter hat man

1 Meter legal = 3.28086938 engl. Fuß
1 „ internat. = 3.28082556 „ „

S. 200. Es ist interessant, die ebenso wichtigen wie mühevollen Versuche zu verfolgen, die die Wellenlänge des Lichtes zur Ausmessung des Meters nutzbar zu machen bestrebt sind. Die grundlegende Arbeit findet man im XI. Bande der Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures (Paris, 1895) wiedergegeben als: Détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueurs d'ondes lumineuses par M. ALBERT A. MICHELSON. Mémoire traduit sur le manuscrit anglais par M. J. RENÉ BENOÎT. Man vergleiche hierzu ev. das Kapitel über Interferenz des Lichtes in MÜLLER-POUILLETS Lehrbuch der Physik und Meteorologie, 9. Aufl., Band II, 1 (Braunschweig, 1897).

Zu Abschnitt VI.

S. 204. Die klassische Abhandlung ARISTARCHS ist uns noch erhalten geblieben. Eine lateinische Übersetzung trägt den Titel: Aristarchi de magnitudinibus et distantiis solis et lunae liber, cum Pappi explicationibus. A. F. COMMANDINO latine, cum comment. Pisauri 1572. Eine deutsche Übersetzung erschien von A. NOKK als Beilage zu dem Freiburger Lyzeums-Programme von 1854. Eine neue Ausgabe obiger Abhandlung nebst englischer Übersetzung und inhaltreichen geschichtlichen Untersuchungen über die griechische Astronomie erschien soeben unter dem Titel Aristarchus of Samos von Sir THOMAS HEATH (Oxford, 1913).

Auf welche Weise er den Wert für den scheinbaren Durchmesser des Mondes erhalten hat, gibt er selbst uns nicht an, dagegen hat uns AMBROS. THEODOS. MACROBIUS in seinen Commentarii in Ciceronis somnium Scipionis (Opera quae supersunt Vol. 1, Quedlinburgi, 1848) eine Methode überliefert, die vielleicht in ähnlicher Weise von ARISTARCH angewandt wurde und auf der Messung des scheinbaren Durchmessers der Sonne beruht, den er dem Durchmesser des Mondes gleichsetzt. In der Zeit, wo die Sonne im Äquator steht, wird an dem von ihm erfundenen Skaphium der Schatten in seiner Ausdehnung vom ersten Augenblick des Erscheinens über dem Horizont an bis zu dem Moment, wo gerade der untere Rand der Sonne den Horizont berührt, gemessen. Wie uns ARCHIMEDES in seinem Arenarius berichtet, nahm ARISTARCH den Sonnendurchmesser zu $^1/_{720}$ der Sonnenbahn, also zu 30 Bogenminuten an.

S. 206. Auf die von PTOLEMAEUS in seinem Almagest angeregten Untersuchungen und Beobachtungen zur Bestimmung der Mondparallaxe geht in anschaulicher Weise die Abhandlung von K. MANITIUS, Die Parallaxen des Mondes und seine Entfernung von der Erde nach Ptolemäus (Weltall, 10. Jahrg.) ein.

Die Arbeiten des POSIDONIUS kennen wir nur durch KLEOMEDES aus seiner κυκλικὴ θεωρία μετεώρων. Eine eingehendere Untersuchung über diese Arbeiten stellt FRIEDR. HULTSCH an in der Schrift: Poseidonios über die Größe und Entfernung der Sonne (Abhandl. der Kgl. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Phil.-hist. Klasse. N. F. Bd. 1 Nr. 5. Berlin, 1897).

Die scheinbare Gestalt und Größe des Himmelsgewölbes ist schon mehrfach der Gegenstand eifriger Diskussion gewesen. So gibt A. G. KÄSTNER in dem Vollständigen Lehrbegriff der Optik nach Herrn ROB. SMITHS Englischem mit Änderungen und Zusätzen (Altenburg, 1755) im 1. Buch Kap. 5 den Versuch einer Darstellung psychologischer Täuschungen. Neuerdings ist ein interessanter Aufsatz von WILH. FILEHNE: Über die scheinbare Form des Himmelsgewölbes und die scheinbare Größe der Gestirne und Sternbilder (Deutsche Revue, Nov. u. Dez. 1912) erschienen. Den Versuch einer mathematischen Bestimmung der Gestalt macht M. DROBISCH in der Schrift: Über die Bestimmung der Gestalt des scheinbaren Himmelsgewölbes (Ber. d. Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss., Jahrgang 1854); und E. REIMANN in: Beiträge zur Bestimmung der Gestalt des scheinbaren Himmelsgewölbes. 2 Teile (Progr. Hirschberg, 1890/91).

MECHANISCHE THEORIE DES PLANETENSYSTEMS.

Von

J. von Hepperger.

Unterscheidung der Planeten von den Fixsternen.

I. Die antiken Weltsysteme. Schon auf ganz früher Kulturstufe, vor den historischen Zeiten, hat die Menschheit allerorts erkannt, daß sich eine kleine Anzahl heller und auffälliger Gestirne von allen übrigen durch ihr sonderbares Fortbewegen über den Sternenhimmel auszeichnet: es sind die Planeten oder Wandelsterne. Man kannte die fünf Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn und rechnete auch die Sonne und den Mond zu ihnen.

Das geozentrische System.

Von den Babyloniern wissen wir, daß sie, wenn nicht früher so doch sicher schon im 5. Jahrhundert v. Chr. die Umlaufszeiten der fünf Planeten ziemlich genau kannten. Die Griechen haben sich in ihrem eigenen Lande mit astronomischen Beobachtungen nur wenig befaßt; desto eifriger arbeiteten sie an dem Entwurfe eines Himmelsbildes, das die Harmonie des Weltenbaues mit ihren philosophischen Axiomen und den aus Ägypten oder Babylonien bezogenen Beobachtungsergebnissen zum Ausdruck bringen sollte.

Pythagoras.

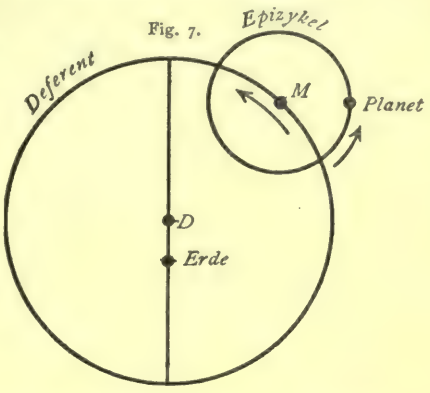
Die erste Frucht dieser Bestrebungen war das pythagoräische Weltsystem, das aus acht die Erde konzentrisch umgebenden Sphären bestand, welche die Planeten, zu denen während der ganzen Herrschaft des geozentrischen Systems auch Mond und Sonne gezählt wurden, und die Gesamtheit der Fixsterne zu tragen hatten. Jede der sieben inneren Sphären sollte mit konstanter, der Umlaufszeit des Planeten entsprechender Winkelgeschwindigkeit rotieren und außerdem an dem täglichen Umschwunge der äußersten (um die Weltachse sich drehenden) Fixsternsphäre teilnehmen. Es hat sich jedoch bald gezeigt, daß ein System konzentrischer Sphären, mochte man ihre Zahl auch noch so sehr vergrößern (Aristoteles nahm 33 revolvierende Sphären an), die Unregelmäßigkeiten der Planetenbewegungen zu erklären

Hipparch.

nicht imstande ist. Für die Sonne erreichte Hipparch, der an den Aristotelischen Prinzipien von der Unbeweglichkeit der Erde und der gleichförmigen Bewegung der Himmelskörper in Kreisen festhielt, einen ziemlich engen Anschluß an die Beobachtungen durch die Annahme einer exzentrischen Stellung des Kreises bezüglich des Erdortes. Für den Mond bedurfte es noch der weiteren Annahme einer retrograden (von Ost nach West) Drehung der Knotenlinie (Schnittlinie der Ebenen beider Kreise) in der Ekliptik und einer gleichförmigen direkten Drehung der Apsidenlinie, der durch den

Erdort an das Zentrum des Mondkreises gehenden Geraden, in der Ebene der Mondbahn. Die Hauptzüge des verwickelten Planetenlaufes hat erst Ptolemäus. Ptolemäus, der letzte unter den hervorragenden Astronomen der Alexandrinischen Schule, durch eine geometrische Konstruktion darzustellen vermocht, indem er nach der Apollonischen Regel, welche das Vor- und Rückwärtsschreiten und den Stillstand der Planeten durch eine gleichförmige Bewegung zweier Kreise erklärt, auf dem exzentrischen Kreise D, Fig. 7, (dem Deferenten) einen mittleren Planeten M und um diesen den wahren Planeten in einem Epizykel laufen ließ.

Fig. 7.



Die Umlaufszeit des mittleren Planeten ist für die äußeren Planeten gleichzusetzen ihrer siderischen Umlaufszeit, für Merkur und Venus aber dem siderischen Jahre, so daß die Bewegung dieser Planeten implizite bereits auf die Sonne bezogen war. Die Umlaufszeit des wahren Planeten im Epizykel (bezüglich der Linie mittlerer Planet—Erde) ist gleich der synodischen Umlaufszeit, nach welcher der Planet am Himmel wieder in dieselbe Stellung zur Sonne gelangt.

Setzt man den Radius des Deferenten gleich 1, so ist der Radius des Epizykels gleich dem Sinus des Winkels, bis zu dem sich, vom Zentrum des Deferenten aus gesehen, der wahre Planet vom mittleren Planeten entfernen kann. Dieser Winkel ist sehr nahe gleich dem arithmetischen Mittel aus zahlreichen auf die Erde bezogenen größten Elongationen des Planeten von seinem mittleren Ort und läßt sich daher durch Beobachtung bestimmen. Ptolemäus gab für die Radien der Epizykeln folgende Werte: Merkur 0.375; Venus 0.720; Mars 0.658; Jupiter 0.192; Saturn 0.109.

Ptolemäus hat das unbestrittene Verdienst, eine Theorie gegeben zu haben, welche bei passender Festsetzung der Neigung von Deferent und Epizykel gegen die Ekliptik den damaligen Beobachtungen in der Hauptsache genügte und auch eine große Entwicklungsfähigkeit zu besitzen schien, indem ja einer Vermehrung der Epizykeln, wovon man sich die Behebung gewisser Unstimmigkeiten versprach, nichts im Wege stand. Dahin waren denn auch die Bemühungen der Astronomen des Mittelalters gerichtet, ohne daß der erwartete Erfolg sich eingestellt hätte. König Alfons X. von Kastilien, welcher aus den Verhandlungen des von ihm 1240 in Toledo einberufenen Astronomenkongresses die dem ptolemäischen System erwachsenen Schwierigkeiten zu überblicken in der Lage war, scheint einer der ersten gewesen zu sein, die an der Richtigkeit dieses Systems zu zweifeln wagten.

II. Das kopernikanische System. In späterer Zeit mehrten sich die Zweifler, doch erst Kopernikus hörte zu zweifeln auf. Seiner Naturanschauung widerstrebte es, eine notleidende Theorie zu akzeptieren, die die Fix- Übergang zum heliozentrischen System. Kopernikus.

sterne an eine Sphäre band und den Planeten, ohne über deren Entfernungen etwas sagen zu können, äußerst komplizierte Bahnen anwies. In dem Bestreben, die Wahrheit zu erforschen, nahm sich Kopernikus, wie er in der dem Papst Paul III. gewidmeten Vorrede zu seinem Werk „De Revolutionibus Orbium Coelestium“ bemerkt, die Mühe, alle ihm zu Gebote stehenden Schriften der alten Philosophen zu lesen, um zu erfahren, ob nicht einer unter ihnen je geglaubt habe, daß die Bewegungen der Himmelskörper andere seien, als jene annehmen, welche in den Schulen Mathematik lehren. Hierbei fand er, daß der Syrakusaner Nicetas und die Pythagoräer Heraklides und Ekphantus die Drehung der Erde von West nach Ost, Philolaus und Aristarch von Samos sogar eine fortschreitende Bewegung der Erde gelehrt haben. Durch diese Lehren auf das lebhafteste angeregt und durch das Beispiel ihrer Verkünder zu selbständiger Forschung ermutigt, verwandte Kopernikus seine ganze Energie auf die Lösung der Frage, ob nicht die Annahme einer bewegten Erde den Beobachtungen der Gestirne besser entspräche und das astronomische Weltbild einfacher und harmonischer gestalte.

Daß die Erscheinungen der täglichen Bewegung sowohl durch eine Drehung des Himmels von Ost über Süd nach West als durch eine im entgegengesetzten Sinne erfolgende Drehung der Erde erklärt werden können, war schon längst bekannt. Die herrschende Meinung von der Unbeweglichkeit der Erde gründete sich vornehmlich auf die Aristotelische Lehre, nach welcher die Erde, als aus den schwersten Elementen zusammengesetzt, die Mitte des kugelförmigen Weltalls einnehmen wird. Eine Rotation sei nicht annehmbar, weil dann die Bestandteile der Erde in kreisförmiger Bewegung erhalten würden, die den irdischen Elementen nicht eigen ist und daher als aufgezwungen bald verschwinden müßte. Ptolemäus hielt die Rotation der Erde ebenfalls für unmöglich, da hierdurch das festeste Gefüge zerfallen und die Trümmer der Erde sich in dem Weltenraum verlieren würden. Übrigens sei der Zug der Wolken, die ja an der Rotation nicht teilnehmen könnten, keineswegs vorherrschend gegen Westen gerichtet.

Kopernikus erkannte bald die Schwäche der für die Unbeweglichkeit der Erde angeführten Argumente. Wer die Erde für bewegt hält, sagt er, braucht nur zu erklären, daß die Bewegung der Erde eine natürliche und nicht eine aufgezwungene sei. Was die Natur macht, habe Bestand, nur die plötzliche Wirkung einer großen Kraft führe zur Zerstörung des Objektes. Die Erde könne daher die Rotation wohl vertragen. Wenn aber schon die Erdkugel beim täglichen Umschwunge nicht bestehen könnte, wie sollte dann die unermeßlich größere Fixsternsphäre die Rotation auszuhalten imstande sein, da ja die Geschwindigkeit mit dem Durchmesser der Kugel wächst? Es sei deshalb vernünftiger, eine Drehung der Erde als eine solche des Himmels anzunehmen. Die Bewegung der Erde habe sich schon längst auf die umgebende Luft übertragen und damit auch den Einfluß auf den Wolkenzug verloren. Diese und ähnliche Erwägungen bestimmten Kopernikus, die

Achsendrehung der Erde rückhaltlos anzunehmen. Beweisen konnte er sie allerdings nicht.

Nachdem Kopernikus die Überzeugung gewonnen hatte, daß es am Himmel auch scheinbare Bewegungen gibt, stellte er sich die Aufgabe, zu untersuchen, ob nicht die großen Unregelmäßigkeiten des Planetenlaufes durch eine fortschreitende Bewegung der Erde erklärt werden können. Für Kopernikus kamen überhaupt nur kreisförmige Bahnen in Betracht. Da Sonne und Mond mit Bezug auf die Erde Kreise zu beschreiben scheinen, so mußte die bewegte Erde als um einen dieser Körper kreisend und vom anderen umkreist angenommen werden.

Bedeutung des Deferenten und Epizikels.

Indem Kopernikus nun die nächstliegende Annahme, nämlich die einer Bewegung der Erde um die Sonne macht, fand er durch Vergleichung der Beobachtungen mit den der ptolemäischen Theorie entsprechenden Elementen der Planetenbahnen, daß der geozentrische Ort des „mittleren Planeten“ mit dem heliozentrischen Orte des „wahren Planeten“ in nahe Übereinstimmung gebracht werden könne, und daß daher auch die Planetenbahnen die ideale Form von Kreisen annehmen, wenn man die Sonne zum Zentralkörper des ganzen Systems macht. Bei Vernachlässigung von Neigung und Exzentrizität der Bahnen läßt sich der Übergang vom ptolemäischen zum kopernikanischen System leicht klarlegen. Seien P ein äußerer Planet, z. B. Jupiter, O sein mittlerer Ort (= Zentrum des Epizykels), E die Erde, OV, EV Linien, die gegen den Frühlingspunkt gerichtet sind, von dem aus die Längen gezählt werden, und ES die Gesichtslinie zur Sonne, so wird eine Oppositionsstellung des Planeten durch Fig. 8, die darauffolgende Konjunktion durch Fig. 9 veranschaulicht.

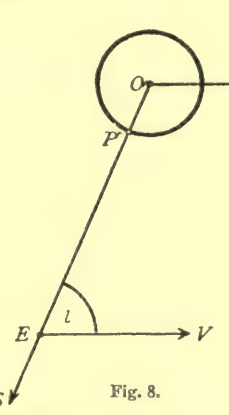


Fig. 8.

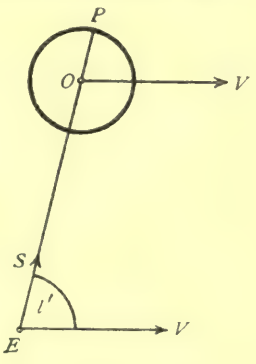
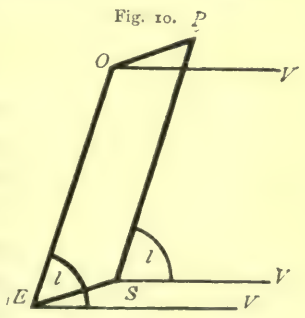


Fig. 9.

In beiden Fällen ist die Länge von P im Epizykel (mit Bezug auf O) gleich der geozentrischen Länge der Sonne. Diese Identität muß auch für jede andere Stellung der Planeten Geltung haben, da sich sowohl P im Epizykel als auch die Sonne um die Erde mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegen sollen. Die Gesichtslinie zur Sonne bleibt daher stets parallel zu OP. Nimmt man nun an, daß der Abstand der Sonne von der Erde gleich sei OP, so bilden die Punkte E, S, O, P die Ecken eines Parallelogramms, und es ist für jede Lage des Planeten (Fig. 10) $EO = SP$ und l sowohl die geozentrische Länge des mittleren Planeten als auch die

Fig. 10.



heliozentrische Länge des wahren Planeten. Für Merkur und Venus hat man sich das Sonnenzentrum als in O befindlich zu denken. Sofern es sich nur um die Bestimmung der Lage des Punktes P handelt, ist es einerlei, ob man nun annimmt, daß der Planet in der (durch die Beobachtungen) gegebenen Umlaufszeit einen Kreis mit dem Radius PS um die Sonne beschreibt, oder daß der Mittelpunkt O des Epizykels in derselben Zeit sich in einem Kreise vom Radius $EO = PS$ um die Erde bewegt und der Planet auf dem Epizykel vom Radius $OP = ES$ in einem tropischen Jahre einen vollen Umlauf um O bezüglich der Linie OV macht.

Das Weltbild jedoch, in dem die Sonne das Zentrum des ganzen Planetensystems einnimmt und die Planeten mit Einschluß der vom Monde umkreisten Erde gleichartige Bahnen von einfachster Form beschreiben, ist eben durch seine Einfachheit viel großartiger und anziehender als das System des Ptolemäus. Es könnte nicht überraschen, wenn Kopernikus sich nur aus diesem Grunde für das heliozentrische System entschieden hätte; er vermochte aber noch einen anderen Grund für die Überlegenheit seiner Lehre anzugeben.

Bestimmung der Entfernung der Planeten von der Sonne.

Ptolemäus wußte über die Entfernung der Planeten nicht mehr zu sagen, als daß ein Planet desto weiter von der Erde entfernt sei, je größer seine Umlaufszeit ist. Kopernikus aber konnte in der Erkenntnis, daß für die äußeren Planeten der Epizykel, für die inneren der Deferent die Abbildung der Erdbahn sei, das Verhältnis der Entfernungen der Planeten von der Sonne zum Erdbahnhalbmesser bestimmen und hierdurch auch die Verteilung der Planeten im Raume überblicken. Bezeichnet man dieses Verhältnis mit a, so erhält man aus den früher mitgeteilten und hier wiederholten Ptolemäischen Angaben die folgenden Werte von a, denen ich die jetzt genau bekannten richtigen Werte beifüge. Man sieht, daß in den Zahlen des Ptolemäus — ihm selbst unbekannt — schon eine ziemlich richtige Ausmessung unseres Planetensystems niedergelegt war.

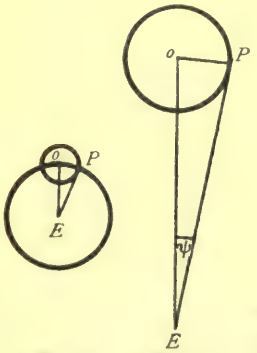


Fig. 11.

Fig. 12.

	Radius des Epizykels / Radius des Deferenten	a Ptolemäus	a richtiger Wert
Merkur	0.375	0.375	0.387
Venus	0.720	0.720	0.723
Mars	0.658	1.520	1.524
Jupiter	0.192	5.21	5.203
Saturn	0.109	9.17	9.539

Für die inneren Planeten siehe Fig. 11 (Merkur), in welcher $OE = 1$, Winkel $OEP = \psi =$ scheinbarer Radius des Epizykels und der wahre Radius des Epizykels $OP = a = \sin\psi$. Für die äußeren Planeten siehe Fig. 12 (Jupiter), in welcher $OP = 1$, scheinbarer Radius des Epizykels $= \psi$ und $OE = a = \frac{1}{\sin\psi}$.

Mit der Bestimmung des Abstandes der Planeten hat Kopernikus die Leistungen der scharfsinnigsten Denker des Altertums und Mittelalters überholt. Mit seinem Namen wird auch das heliozentrische System bleibend verknüpft sein, trotzdem wahrscheinlich schon Plato, gewiß aber Aristarch von Samos (260 v. Chr.) die Ansicht ausgesprochen hatten, der Himmel stehe still, die Erde dagegen bewege sich in einem schiefen Kreise um die Sonne und drehe sich zugleich um ihre Achse. Denn Kopernikus war es, der diese Idee aus dem Schatten der Vergessenheit zog und durch Verallgemeinerung und eingehende Begründung zu einer lebenskräftigen, wissenschaftlichen Lehre erhob. In einer Beziehung vermochte sich aber auch Kopernikus von der überlieferten Anschauung nicht freizumachen, indem er zur Darstellung der Bewegungen des Mondes und der Planeten ebenfalls nur Kreise verwendete und, da der exzentrische Kreis allein keinen genügenden Anschluß an die Beobachtungen zuließ, auch wieder zum Epizykel, für den Mond sogar zum Epi-Epizykel griff. Bei der Ungenauigkeit der damaligen Beobachtungen konnte man auch auf diesem Wege einstweilen noch eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Rechnung erreichen.

Mängel der kopernikanischen Lehre.

Die Komplikation, welche die neue Lehre durch die Verwendung der Epizykel erfuhr, und der Umstand, daß Kopernikus zur Erklärung der konstanten Richtung der Erdachse bei den verschiedenen Stellungen der Erde zur Sonne irrtümlicherweise eine jährliche konische Bewegung der Erdachse um eine Normale zur Ekliptik annahm, verschleierten die Vorzüge des heliozentrischen Systems und trugen zur Gefährdung des Erfolges des erst nach dem Tode (1543) des Verfassers erschienenen Werkes „De Revolutionibus Orbium Coelestium“ nicht wenig bei. Man darf, um die Gegnerschaft der in der alten Schule aufgewachsenen Astronomen zu begreifen, nicht übersehen, daß die Überlegenheit der kopernikanischen Lehre hauptsächlich in der idealeren Auffassung von der Einrichtung des Universums besteht, in praktischer Hinsicht jedoch, sowohl was die Güte der Darstellung der Beobachtungen als auch die auf die Berechnung der Planetenörter zu verwendende Arbeit anlangt, kaum zum Vorschein kommt. Zudem schien die Bewegung der Erde mit der Unveränderlichkeit der Lage der Fixsterne nicht vereinbar zu sein (vgl. S. 208).

Die Arbeiten des Kopernikus bilden die Grundlage der von E. Reinhold herausgegebenen (1551) „Prutenicae Tabulae Coelestium Motuum“, die bis zum Erscheinen von Keplers „Rudolphinischen Tafeln“ die Bewegungen der Körper unseres Sonnensystems am besten darstellten. Von der Genauigkeit dieser Tafeln darf man deshalb noch keine besonders hohe Meinung haben. Denn ein Tafelfehler konnte erst dann angenommen werden, wenn die Unsicherheit der verglichenen Beobachtung erheblich kleiner war als der Abstand des beobachteten Ortes von dem aus der Tafel berechneten Orte. Infolge vernachlässigter Pflege der Beobachtungskunst war die Unsicherheit der Winkelmessung um die Mitte des 16. Jahrhunderts noch ungefähr

ebenso groß wie zu Ptolemäus' Zeiten und kaum geringer als $\pm$ 10 Bogenminuten.

Derartige Beobachtungen genügten zwar immer noch reichlich zur Konstatierung von Tafelfehlern, waren aber nicht geeignet, den Forscher in der Aufsuchung der Fehlerquellen wirksam zu unterstützen. Es mußten erst zahlreiche, enger verbundene und viel genauere Beobachtungen von Sonne, Mond und Planeten gemacht werden, bevor man die Erkenntnis gewinnen konnte, daß zur Erreichung eines genügenden Anschlusses an die Beobachtungen die Annahme von Kreisbewegungen nicht tauglich und daher durch eine andere zu ersetzen sei.

Tycho Brahe.

III. Tycho—Kepler. Ein Beobachtungsmaterial von solcher Beschaffenheit lieferte Tycho Brahe (1546—1601), ein dänischer Edelmann, den Begeisterung für die Naturbetrachtung, Erfindungsgabe und Geschick zu einem der größten Meister in der Beobachtungskunst gemacht haben.

Erhöhung der Genauigkeit der Beobachtungen.

Tycho hat sich schon frühzeitig der Astronomie gewidmet und zuerst mit billigen, zum Teil selbstverfertigten Instrumenten beobachtet, um die Genauigkeit der Vorausberechnung der Planetenörter zu prüfen. Hierbei fand er, daß alle ihm zu Gebote stehenden Tafeln, einschließlich der Reinholdschen, große Fehler aufwiesen. Aber auch die eigenen Beobachtungen befriedigten ihn nicht, da sich hieraus der Planetenlauf nur sehr unsicher darstellen ließ. In der Überzeugung, daß zur Erforschung der wahren Bahnen der Planeten eine viel genauere Kenntnis der scheinbaren Bahnen nötig sei, stellte er sich die Aufgabe, die Genauigkeit der Beobachtungen durch Vervollkommnung der Instrumente und Reduktionsmethoden zu erhöhen und die Positionen aller bewegten Himmelskörper so oft wie möglich zu bestimmen. In diesem Unternehmen ward Tycho sehr gefördert durch die dauernde Gunst seines Königs (Friedrich II.), der ihm auf der Insel Hven im Sunde die Sternwarten Uranienborg und Stjerneborg erbauen ließ und zu deren Einrichtung und Betrieb reiche Geldmittel anwies. So konnte Tycho seine konstruktiven Ideen verwirklichen und tüchtige Gehilfen heranziehen, die ihn bei allen astronomischen Arbeiten auf das wirksamste unterstützten. Durch Verbesserung der Instrumente, Ermittlung und Berücksichtigung der Fehler ihrer Aufstellung und Justierung, genauere Bestimmung der Refraktion und große Übung gelang es Tycho, Beobachtungen zu erhalten, deren durchschnittlicher Fehler 1′ kaum überstieg. Die erhöhte Genauigkeit der Messungen ließ Tycho die mit dem Namen Variation belegte Unregelmäßigkeit der Mondbewegung sowie Ungleichheiten der Bewegung des Knotens und der Neigung der Mondbahn erkennen; sie berechtigte ihn auch zur Behauptung, daß die von ihm beobachteten Kometen viel weiter entfernt waren als der Mond, da sonst deren Parallaxe nicht unmerklich geblieben wäre. Tycho hat auch einen den älteren Katalogen bedeutend überlegenen Sternkatalog angelegt. Diese Leistungen begründen das hohe Ansehen, in dem er bei seinen Zeitgenossen stand. Tycho war ein großer Beobachter, aber kein

großer Denker. Ihm widerstrebte es, eine Bewegung der Erde anzunehmen; doch glaubte er die kopernikanische Lehre nicht ganz verwerfen zu sollen und suchte einen Ausgleich zwischen der älteren und neueren Lehre dadurch herbeizuführen, daß er die Unbeweglichkeit der Erde und die Rotation der Fixsternsphäre dem ptolemäischen, die Bewegung der fünf Planeten um die Sonne aber dem kopernikanischen System entnahm. Dieses Vorgehen fand nicht den erwarteten Beifall; Kepler hat in einer Polemik mit Anhängern Tychos dessen System als die aufgewärmten Brezeln der Alten bezeichnet. Hypothese Tychos.

Nach 21jähriger Beobachtungstätigkeit auf der Insel Hven zog Tycho, dessen Stellung nach König Friedrichs Tode immer schwieriger geworden war, im Jahre 1597 nach Wandsbek und zwei Jahre später nach Prag, wohin ihn Kaiser Rudolph II. berufen hatte. In dem Bestreben, für die wissenschaftliche Verwertung der nach Tausenden zählenden Beobachtungen eine hervorragende Kraft zu gewinnen, lud Tycho Brahe den durch die Veröffentlichung des „Mysterium Cosmographicum“ schon in weiteren Kreisen bekannt gewordenen Kepler zu sich nach Prag und wußte ihm die Stelle eines kaiserlichen Mathematikers zu verschaffen. Die Verbindung der zwei grundverschiedenen Männer zu gemeinsamer Arbeit dauerte nicht lange, da Tycho schon im Jahre 1601 vom Tode ereilt wurde. Seine Erben wollten den Nachlaß ganz für sich behalten, ließen sich aber von Kepler wenigstens dazu bestimmen, ihm die von Tycho so sehr gewünschte Verbesserung der Marstheorie und das hierzu dienliche große Beobachtungsmaterial anzuvertrauen.

Johannes Kepler, geb. 1571 zu Weil der Stadt in Württemberg, ging nach Absolvierung der Schulen zu Adelberg und Maulbronn nach Tübingen (1589), wo er Theologie und unter der Leitung Mästlins auch Mathematik und Astronomie studierte. Er wurde sofort ein eifriger Anhänger der kopernikanischen Lehre und hat sich hierdurch die Aussicht auf Erlangung eines geistlichen Amtes wesentlich verschlechtert. Als ihm, wahrscheinlich nicht ohne Mästlins Verwendung, die Stelle eines Landschaftsmathematikers von Steiermark angeboten wurde, nahm er die Stelle an und begab sich (1594) nach Graz, wo er bis zum Jahre 1600 verblieb. Kepler.

Die Richtschnur für Keplers erfolgreiche Untersuchungen bildete der Gedanke, daß im Sonnensystem eine wunderbare Harmonie herrsche, die sich in gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den Entfernungen und Bewegungen der Planeten offenbaren müsse. Zuerst suchte Kepler geometrische Beziehungen zwischen den von Kopernikus angegebenen Radien der Planetenbahnen zu finden. Die im „Mysterium Cosmographicum“ mitgeteilte vermeintliche Lösung dieses Problems besteht darin, daß bei folgender Anordnung der fünf regelmäßigen Körper die Radien der ihnen um- und eingeschriebenen Kugelflächen (die hier mit den Planetennamen bezeichnet sind) die heliozentrischen Entfernungen der Planeten darstellen: Mysterium Cosmographicum.

Saturn-Würfel-Jupiter-Tetraeder-Mars-Dodekaeder-Erde-Ikosaeder-Venus-Oktaeder-Merkur.

Wirklichen Wert hat diese Konstruktion nicht, da hierdurch den tatsächlichen Verhältnissen der Planetenabstände nur in roher Annäherung Rechnung getragen wird. Doch ist die Verfolgung des Weges, auf dem Kepler zu diesem Resultat gelangte, immerhin sehr interessant. Seine große Begabung tritt erst bei der Bearbeitung der Marsbeobachtungen zutage.

Bestimmung der Bahnen von Erde und Mars.

Nach vielen vergeblichen Versuchen, die Beobachtungen unter Verwendung der überlieferten Erdbahnelemente durch die Annahme einer Kreisbewegung des Mars darzustellen, trachtete Kepler Annahmen ganz zu vermeiden und wußte sich ein Verfahren zurechtzulegen, das ihm gestattete, die Bahn der Erde sowohl als des Mars unmittelbar aus den Beobachtungen abzuleiten. Das Verfahren beruht auf einer Kombination von Beobachtungen, die um ganze Vielfache der siderischen Umlaufszeit (U) des Mars voneinander abstehen; nach Ablauf solcher Perioden befindet sich Mars wieder in demselben Punkte seiner Bahn und hat daher bei Zugrundelegung eines fixen Äquinoktiums wieder dieselben heliozentrischen Koordinaten.

Wenn man die ohnehin geringe Neigung (1° 52′) der Marsbahn vernachlässigt, wird die Auseinandersetzung der Methode sehr einfach. Von einer Beobachtung des Mars zur Zeit einer Opposition (t_0) ausgehend, erhielt man aus der Länge λ des Mars für $t = t_0 \pm jU$ ($j = 1, 2, 3 \ldots$) und der korrespondierenden Länge L der Erde (L = Sonnenlänge + 180°) das Verhältnis der Entfernungen der Sonne von Erde und Mars.

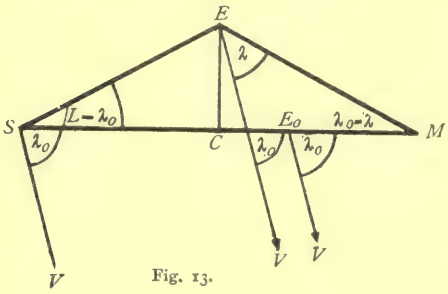


Fig. 13.

Ist $t = t_0$, so liegen Sonne, Erde, Mars in einer Geraden (SE_0M), und λ_0 ist sowohl die geozentrische als auch die heliozentrische Länge des Mars; die Länge der Erde wird ebenfalls gleich λ_0 (Fig. 13).

Zur Zeit $t_0 \pm jU$ befinde sich die Erde in E. Im Dreiecke SEM (Fig. 13) ist der Winkel bei M gleich $\lambda_0 - \lambda$, bei S gleich $L - \lambda_0$, bei E daher $180° - (L - \lambda)$, und es wird

$$\frac{SE}{SM} = \frac{\sin(\lambda_0 - \lambda)}{\sin(L - \lambda)};$$

die Koordinaten von E sind:

$$SC = SE \cdot \cos(L - \lambda_0)$$
$$CE = SE \cdot \sin(L - \lambda_0).$$

Den von Kepler aus Tychos Beobachtungen durch Änderung des Wertes oder Vorzeichens von j erhaltenen Erdörtern ließ sich ganz gut ein Kreis anpassen, dessen Radius nun als Maß der Entfernung gewählt wurde. Das Verhältnis von SM zum Radius des Erdkreises gab die heliozentrische Entfernung des Mars in dem durch λ_0 bestimmten Punkte seiner Bahn.

Um andererseits eine zur Konstruktion der Marsbahn genügende Anzahl von Positionen zu gewinnen, wählte Kepler zahlreiche Paare von Beobachtungen aus, die ziemlich gleichmäßig über die Bahn des Planeten ver-

teilt waren. Das Intervall der Beobachtungszeiten betrug für jedes Paar wieder $\pm jU$, so daß stets je zwei Beobachtungen sich auf dieselbe heliozentrische Position des Mars bezogen.

Jedes Beobachtungspaar liefert zwei Gleichungen zur Bestimmung der heliozentrischen Distanz ρ und Länge l des Mars (Fig. 14):

$$\rho \sin (l - \lambda') = r' \sin (L' - \lambda'),$$
$$\rho \sin (l - \lambda'') = r'' \sin (L'' - \lambda'').$$

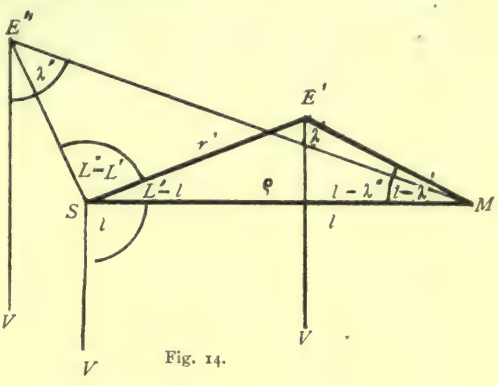


Fig. 14.

Ersetzt man in der zweiten Gleichung $l - \lambda''$ durch $l - \lambda' - (\lambda'' - \lambda')$ und dann $\rho \sin (l - \lambda')$ durch $r' \sin (L' - \lambda')$, so können die Gleichungen in einer zur Berechnung von ρ und l bequemeren Form geschrieben werden:

$$\rho \sin (l - \lambda') = r' \sin (L' - \lambda')$$
$$\rho \cos (l - \lambda') = \frac{r' \sin (L' - \lambda') \cos (\lambda'' - \lambda') - r'' \sin (L'' - \lambda'')}{\sin (\lambda'' - \lambda')}.$$

Die Keplerschen Gesetze.

Die graphische Darstellung der auf diesem Wege erhaltenen Marsörter ließ Kepler erkennen, daß die Bahn des Mars kein Kreis, sondern eine Kurve sei, deren größter Durchmesser wohl den Sonnenort enthalten könne, aber durch ihn nicht halbiert wird. Nach längerem vergeblichen Bemühen, die charakteristische Form dieses Ovals festzustellen, legte sich Kepler die Frage vor, ob nicht etwa an Stelle des Ovals eine Ellipse zu setzen sei. Die wichtigsten Eigenschaften der Ellipse waren schon durch die Arbeiten griechischer Mathematiker bekannt geworden, so daß leicht zu entscheiden war, ob die gefundenen Marsörter durch eine Ellipse genügend genau dargestellt werden können. Kepler fand, daß dies der Fall ist, und erkannte auch, daß einer der Brennpunkte mit dem Sonnenorut zidentifizieren sei. Seine nächste Arbeit war die Untersuchung der Bahnen der übrigen Planeten, deren elliptischer Charakter durch die exzentrischen Kreise der alten Theorie schon angedeutet war. Bei der großen Exzentrizität (0.093) der Marsbahn vermochte der exzentrische Kreis die Ellipse nicht mehr zu ersetzen; es blieben Fehler bestehen, die bis zu acht Bogenminuten reichten und daher die Unsicherheit der Beobachtungen weit überstiegen. Die Beobachtungen der anderen Planeten hätten wegen der viel geringeren Exzentrizität ihrer Bahnen die Entdeckung der wahren Bahnform kaum möglich gemacht; sie genügten aber, um Kepler zu überzeugen, daß das die Bewegung des Mars beherrschende Gesetz auf alle Planeten anwendbar ist. Es hat daher zu lauten: Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, die einen gemeinsamen Brennpunkt haben, in welchem die Sonne sich befindet.

Dieses Gesetz, das der Sonne eine dominierende Stellung im Planetensystem einräumt, verdient als das erste der Keplerschen Gesetze bezeichnet zu werden. Die Relation zwischen Sektor und Zeit ist von Kepler durch

Vergleichung der Bewegung der Erde in der Nähe von Perihel und Aphel zwar schon früher gefunden worden; sie bezog sich aber damals noch auf den exzentrischen Kreis, für den sie eigentlich nicht gilt, und erhielt den Charakter eines Gesetzes erst durch die fokale Stellung der Sonne. Dieses als allgemeingültig erkannte zweite Gesetz lautet: Die von dem Radiusvektor eines Planeten binnen verschiedenen Zeiten beschriebenen Flächen sind diesen Zeiten proportional. Beide Gesetze sind von Kepler in seinem 1609 zu Prag erschienenen Werk: „Astronomia nova de motibus stellae Martis ex observationibus Tychonis Brahe" publiziert worden. Die lange Zeit vergeblich gesuchte Beziehung zwischen den Abständen und Bewegungen der Planeten fand Kepler im Jahre 1618; sie wurde in den 1619 zu Linz herausgegebenen „Harmonices mundi libri V" bekannt gemacht und bildet das dritte Gesetz: Die Quadrate der Umlaufszeiten der Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Achsen ihrer Bahnellipsen. Diese letzte und bedeutendste Errungenschaft der Keplerschen Forschung verbindet die Glieder des Sonnensystems zu einem einheitlichen Ganzen.

Keplers Ansichten über die Gravitation.

Die Ursache der gesetzmäßigen Bewegung der Planeten zu ergründen, war Kepler nicht vergönnt, obwohl er über die Schwerkraft und ihre Wirkungen richtige Ansichten hatte, wie aus den einleitenden Bemerkungen zur Astronomia nova hervorgeht: Die Schwerkraft ist eine allen Körpern gemeinsame Eigenschaft, infolge deren sie wechselseitig nach Vereinigung streben. Bei kugelförmigen Körpern liegt die Richtung der Kraft in der Verbindungslinie der Zentren. Wäre die Erde keine Kugel, so gäbe es auch kein einheitliches Zentrum für den Fall der Körper. Zwei von der Ruhelage aus gegeneinander fallende Körper würden sich so bewegen, daß die von jedem der Körper zurückgelegte Wegstrecke im umgekehrten Verhältnisse zu seiner Masse steht. Für Erde und Mond müßte dasselbe zutreffen, falls die Revolutionsbewegung aufhörte. Alles Meerwasser würde auf den Mond übergehen, sobald es der Anziehung der Erde nicht mehr unterworfen wäre. Die Gezeiten sind durch die vom Mond bis zur Erde reichende Schwerkraft verursacht.

Keplers letzte Arbeit war die Berechnung und Herausgabe (1627) der „Tabulae Rudolphinae", die gegenüber den Reinholdschen Tafeln einen großen Fortschritt bekunden. Kepler starb am 15. Nov. 1630 zu Regensburg. Seine Gesetze fanden anfangs geringe Beachtung; allgemeine Anerkennung wurde ihnen erst zuteil, nachdem Newton sie zur Grundlage seiner Gravitationslehre gemacht hatte.

IV. Newton und die mechanische Theorie des Planetensystems.

Newton.

Isaak Newton wurde am 25. Dezember 1642 in Whoolsthorpe (Lincolnshire) geboren und machte seine Studien an der Universität zu Cambridge, an der er später die Lehrkanzel für Mathematik versah. Von der Natur mit den herrlichsten Geistesgaben ausgestattet und durch ernste Arbeit in den Besitz eines reichen Schatzes von Kenntnissen gelangt, vermochte Newton

der von ihm schon sehr frühe (1665?) gefaßten Idee von der allgemeinen Gravitation die Form eines Gesetzes zu geben, das allen Erfahrungstatsachen vollauf Rechnung trug, zu vielen Entdeckungen Anlaß gab und noch jetzt das Fundament der Himmelsmechanik bildet. Zur Beleuchtung der Situation, die Newton vorfand, mögen neben dem Hinweis auf die Arbeiten Keplers folgende Angaben dienen:

Descartes hatte bereits die analytische Geometrie begründet, Galilei die Gesetze der Trägheit und des freien Falls der Körper bekanntgemacht, Huygens das Wesen und die Wirkung der Zentrifugalkraft erforscht und Picard (1671) durch eine Gradmessung die Länge des Erdradius bestimmt. Newton hat den Weg, der ihn zu seinen Entdeckungen führte, nicht angegeben. Eine Rekonstruktion desselben bleibt daher immer mit ziemlicher Unsicherheit behaftet.

Entwicklung der Theorie der Gravitation.

Die anscheinende Unabhängigkeit der Schwere von der Höhenlage der Körper auf der Erde bestimmte Newton zur Annahme, daß die Schwerkraft der Erde bis zum Monde reiche und auch in dieser Entfernung noch genüge, um den Mond dauernd an die Erde zu binden. Eine Prüfung dieser Annahme setzte die Kenntnis des Gesetzes von der Abnahme der Schwere voraus.

Die Gleichartigkeit der Bewegung des Mondes um die Erde und der Planeten um die Sonne ließ darauf schließen, daß die Planeten durch die Schwerkraft der Sonne in ihren Bahnen erhalten werden, wenn die bezüglich des Mondes gemachte Annahme richtig ist. Die Gesetze der Planetenbewegungen waren schon gefunden. Newton bewies, daß das zweite Keplersche Gesetz eine Folge der Zentralbewegung sei.

Rechtfertigung der Annahme einer Zentralkraft.

Ist AB (Fig. 15) der Weg, den ein Planet nach dem Trägheitsgesetze in einer sehr kleinen Zeit τ zurücklegen würde, und AC die Strecke, um die sich der Planet in derselben Zeit der in S befindlichen Sonne nähern würde, falls nur die anziehende Kraft der Sonne in Betracht käme, so gelangt infolge des Zusammenwirkens der Bewegungsimpulse der Planet in den Punkt D des Parallelogramms $ABCD$. Nach abermaligem Verlauf der Zeit τ würde der tangentiellen Geschwindigkeit die Strecke $DE = AD$ entsprechen, wogegen die Fallhöhe DF der Strecke AC durchaus nicht gleich sein muß (Gleichheit bestände nur, wenn $SA = SD$ ist). Der neue Ort des Planeten wird der Punkt G des mit den Seiten DE und DF konstruierten Parallelogramms sein. Die Dreiecke SDG und SDE sind flächengleich, da sie dieselbe Grundlinie SD und wegen der parallelen Lage von DF und EG auch gleiche Höhe haben. Es sind aber auch die Dreiecksflächen SAD und SDE infolge gleichgroßer Grundlinien und identischer Höhe einander gleich und daher auch $SAD = SDG$. Je kleiner τ wird, desto näher rücken die Punkte D, G nach A hin, und desto

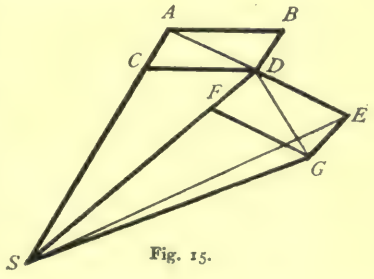


Fig. 15.

genauer wird die Fläche des Sektors durch die des Dreiecks dargestellt. Die in gleichen Zeiten vom Radiusvektor beschriebenen Sektoren setzen sich daher aus einer gleichgroßen Zahl sehr kleiner, flächengleicher Sektoren zusammen und haben dementsprechend dieselbe Größe. Ob man sagt, die Sektorflächen sind den Zeiten proportional, oder in gleichen Zeiten sind die Sektorflächen einander gleich, ist einerlei.

Wirkungsweise der Zentralkraft.

Das dritte Keplersche Gesetz, das für Bahnen von großer Exzentrizität (Merkur: o″206) ebenso gilt wie für solche von sehr kleiner Exzentrizität (Venus: o″007), ließ Newton darauf schließen, daß es auch für die Kreisbahn gelte. In der Kreisbahn (Fig. 15) wird der Winkel zwischen dem Radius SA und der Tangente AB ein rechter; es steht daher auch die Linie CD auf SA senkrecht. Daraus folgt $(AD)^2 - (AC)^2 = (CD)^2 = (SD)^2 - (SC)^2$. Da die Punkte A, D, G auf einem Kreise liegen sollen, ist $SD = SA$. Setzt man $SA = a$, so kann die quadratische Gleichung geschrieben werden: $(AD)^2 - (AC)^2 = a^2 - (a - AC)^2$ oder $(AD)^2 = 2a \cdot AC$. Da bei der Kreisbewegung die Geschwindigkeit konstant ist, wird, wenn U die Umlaufszeit bedeutet, $\frac{AD}{2a\pi} = \frac{\tau}{U}$. Bezeichnet man die von der Sonne auf die Einheit der Masse des Planeten in der Entfernung a wirkende Kraft, die durch die Beschleunigung der Fallbewegung in der Richtung zur Sonne ausgedrückt wird, mit f, so ist nach dem Gesetz des freien Falles $AC = \frac{1}{2} f\tau^2$. Die Substitution der für AD und AC gefundenen Ausdrücke in die Gleichung $(AD)^2 = 2a \cdot AC$ gibt $f = \frac{4a\pi^2}{U^2}$. Für einen anderen Planeten, der die Entfernung a' und die Umlaufszeit U' besitzt, wäre die auf die Masseneinheit bezogene Anziehungskraft f' der Sonne gegeben durch $f' = \frac{4a'\pi^2}{U'^2}$. Es wird daher $\frac{f}{f'} = \frac{a}{a'}\left(\frac{U'}{U}\right)^2$, woraus mit Rücksicht auf das dritte Gesetz $\left(\frac{a'}{a}\right)^3 = \left(\frac{U'}{U}\right)^2$ folgt $\frac{f}{f'} = \left(\frac{a'}{a}\right)^2$. Damit war der Beweis erbracht, daß die anziehende Kraft der Sonne dem Quadrate der Entfernung umgekehrt proportional ist.

Die Zentralkraft ist mit der Schwerkraft identisch.

Nachdem Newton in den Bewegungen der Planeten das gesetzmäßige Wirken einer Zentralkraft erkannt hatte, deren Sitz die Sonne ist, konnte er nicht mehr daran zweifeln, daß die der heliozentrischen Bewegung der Planeten analoge geozentrische Bewegung des Mondes unter dem Einflusse einer von der Erde ausgehenden Zentralkraft vor sich gehe. Diese Kraft hielt Newton für identisch mit der auf die Entfernung des Mondes reduzierten irdischen Schwerkraft und vermochte auch seine Anschauung in überzeugender Weise zu begründen.

Die Schwerkraft an der Erdoberfläche war schon genügend bekannt; sie bewirkt eine Beschleunigung g von 9.8 Meter in der Sekunde. Für die Erde kam zunächst nur die Kugelform in Betracht. Da hierbei der Zug der Schwere überall gegen den Mittelpunkt gerichtet ist, mußte das Erdzentrum als der Punkt angesehen werden, auf welchen die Entfernungen in dem Gesetze über die Abnahme der anziehenden Kraft zu beziehen sind. Bedeutet a den Ra-

dius der als kreisförmig angenommenen Mondbahn, r den Erdhalbmesser, so drückt das Verhältnis $\frac{a}{r}$ aus, wievielmal der Mond vom Attraktionszentrum weiter absteht als ein Punkt der Erdoberfläche, wo die Schwerkraft gleich g ist. Es ist daher bei Anwendung der Gleichung $f = \frac{4a\pi^2}{U^2}$ auf die Mondbewegung an Stelle von f zu setzen $g\left(\frac{r}{a}\right)^2$, woraus folgt:

$$g = a\left(\frac{2a\pi}{rU}\right)^2.$$

Die Werte der Größen auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens sind, wenn r mit dem Äquatorialradius der Erde identifiziert wird,

$$2\pi = 6.2832,$$
$$\frac{a}{r} = 60.278,$$
$$a = 384415000 \text{ Meter},$$
$$U = 27^d\,7^h\,43^m\,11^s = 2360591 \text{ Zeitsekunden}.$$

Die Rechnung ergibt $g = 9.896$ Meter in der Sekunde und stellt sonach den beobachteten Wert von g sehr nahe dar.

Das Resultat seiner Rechnung überzeugte Newton von der Richtigkeit der Annahme, daß die der Mondbewegung entsprechende Zentralkraft die Schwerkraft der Erde sei. Es erschien zugleich auch die Anwendung des aus den Planetenbewegungen abgeleiteten, die Änderung der Zentralkraft mit der Entfernung ausdrückenden Gesetzes auf die Schwerkraft der Erde gerechtfertigt, da hierdurch der Fall des Mondes gegen die Erde durch eine bekannte Kraft genügend erklärt wird, was mit Rücksicht auf den ökonomischen Haushalt der Natur von großer Wichtigkeit ist.

Nun konnte es kaum mehr einem Zweifel unterliegen, daß die durch die Planetenbewegungen angezeigte, gegen die Sonne gerichtete Kraft die Schwerkraft der Sonne ist.

Die Bewegung erfolgt in Kegelschnitten.

Zur Ableitung des Gesetzes über die Abnahme der Schwere hatte Newton die Voraussetzung gemacht, daß das dritte Keplersche Gesetz auch für Kreisbahnen gilt. Eine auf Veranlassung Hookes durchgeführte theoretische Untersuchung der Kurve, welche Geschosse (bei Vernachlässigung des Luftwiderstandes) beschreiben, ließ Newton erkennen, daß bei Zugrundelegung des Gesetzes der Schwere die Bahn durch eine Ellipse dargestellt wird mit dem Erdzentrum in einem der Brennpunkte. Hierdurch war zugleich die Interpretation des ersten Keplerschen Gesetzes gefunden. Eine erweiterte Untersuchung der Zentralbewegung hatte das Ergebnis, daß das angenommene Kraftgesetz die Bewegung eines Körpers in jedem beliebigen Kegelschnitt ermöglicht. Newton bestimmte auch die Bedingungen, unter denen die Kurve ein Kreis, eine Ellipse, Parabel oder Hyperbel wird; er bewies ferner, daß, soweit nur die Anziehung des Zentralkörpers Berücksichtigung

findet, das dritte Keplersche Gesetz eine notwendige Folge des Gesetzes der Schwere sei.

Newtons Gravitationsgesetz.

Aus der geringen Beeinflussung der Bewegung der Satelliten durch die Revolutionsbewegung der Planeten folgert Newton, daß die Anziehung der Sonne sich auch auf die Satelliten erstrecken müsse, und aus der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, daß jeder Körper, der einen anderen anzieht, von diesem mit gleichgroßer Kraft angezogen wird (die dem Körper mitgeteilte Beschleunigung ist aber der zu bewegenden Masse umgekehrt proportional). Durch sorgfältige Experimente erkannte Newton in der Schwere eine allen irdischen Körpern gemeinsame, von Aggregatform, Mischung, Druck und Temperatur vollkommen unabhängige Eigenschaft der Materie. Diesen Gedankengang weiter verfolgend gelangte er durch Induktion zur Erkenntnis des Gesetzes der allgemeinen Gravitation: Jedes Molekül zieht alle anderen Moleküle mit einer Kraft an, die seiner Masse direkt, dem Quadrate der Entfernung des Moleküls von den anderen aber umgekehrt proportional ist. Dieses Gesetz bildet die Grundlage der Himmelsmechanik. Newton selbst hat die Fruchtbarkeit der Anwendung desselben an vielen Beispielen gezeigt. Infolge der wechselseitigen Anziehung aller Moleküle ziehen sich zwei Kugeln, in denen die Dichte konstant ist oder nur von der Entfernung vom Zentrum abhängt, so an, als ob die ganze Masse jeder Kugel in ihrem Mittelpunkte vereint wäre. Die Körper unseres Sonnensystems wirken daher fast genau so aufeinander ein wie materielle Punkte. Bei der Zentralbewegung in einer geschlossenen Kurve (Ellipse, Kreis) ist die durch die Beschleunigung gemessene Kraft, mit welcher zwei durch die Strecke a getrennte Körper sich anziehen, gleich $\frac{4a\pi^2}{U^2}$; auf die Einheit der Distanz reduziert wäre sie daher gleich $\frac{4a^3\pi^2}{U^2}$. Diese Beschleunigung ist die Summe der Beschleunigung des Begleiters in seinem Falle gegen den Zentralkörper und der des Zentralkörpers in seinem Falle gegen den Begleiter. Da in der Einheit der Entfernung die Beschleunigung nur von der Masse des anziehenden Körpers abhängt und dieser proportional ist, wird, wenn M die Masse des Zentralkörpers, m die des Begleiters ausdrückt,

Bestimmung von Massen.

$$C(M+m) = \frac{4a^3\pi^2}{U^2}.$$

Die Einheit der Masse kann stets so gewählt werden, daß $C = 4\pi^2$ wird; dann wird

$$M + m = \frac{a^3}{U^2} \text{ oder } M = \frac{a^3}{U^2\left(1 + \frac{m}{M}\right)}.$$

Das dritte Gesetz in der ihm von Kepler gegebenen Form setzt daher, strenge genommen, Gleichheit der Planetenmassen voraus. Die Massen der Planeten sind zwar sehr ungleich; aber ausnahmslos sehr klein im Verhältnis zur Sonnenmasse, so daß schon $\frac{a^3}{U^2}$ einen guten Näherungswert für die

Sonnenmasse gibt. Die durch Newton veranlaßte Verbesserung des dritten Keplerschen Gesetzes besteht in der Ersetzung der Umlaufszeit U durch

$$U\sqrt{1+\frac{m}{M}}.$$

Den Zusammenhang zwischen den Größen M, m, a, U eines Systems mit den entsprechenden Größen M', m', a', U' eines anderen gibt die Gleichung

$$\frac{M'+m'}{M+m}=\left(\frac{a'}{a}\right)^3:\left(\frac{U'}{U}\right)^2,$$

welche allgemeine Gültigkeit besitzt und schon von Newton zur Bestimmung der Masse von Planeten verwendet worden ist, die mindestens einen Satelliten haben.

Sei m die zu bestimmende Summe der Massen von Erde und Mond, so geht, da nicht die Erde, sondern der Schwerpunkt des Systems Erde—Mond sich in einer Ellipse um die Sonne bewegt, die Gleichung über in:

$$\frac{m}{M+m}=\left(\frac{a'}{a}\right)^3:\left(\frac{U'}{U}\right)^2 \quad (a' = \text{Mondbahnhalbmesser, } U' = \text{siderischer Monat}).$$

Aus den Daten:

$a' = 384415$ Kilometer; $\quad U' = 27.3216$ Tage

$a = 149500000$ „ $\quad U = 365.2564$ „

folgt

$$\frac{a'}{a}=0.002571, \quad \frac{U'}{U}=0.074801$$

und daraus für das Verhältnis der Masse von Erde + Mond zur Sonnenmasse

$$\frac{m}{M}=\frac{1}{329500}.$$

In gleicher Weise erhält man aus den in Halbmessern der Erdbahn ausgedrückten Halbachsen und den in siderischen Jahren angegebenen Umlaufszeiten der vier von Galilei entdeckten Satelliten des Jupiter das Verhältnis der Masse m' = Jupiter + Satellit zur Masse $M+m$ = Sonne + Erde + Mond; bei der Kleinheit von $\frac{m}{M}$ kommt fast nur die Sonnenmasse in Betracht.

Satellit	I	II	III	IV
$\frac{a'}{a}$	0.002819	0.004483	0.007155	0.012585
$\frac{U'}{U}$	0.004844	0.009723	0.019588	0.045692
$\frac{m'}{M+m}$	$\frac{1}{1047}$	$\frac{1}{1049}$	$\frac{1}{1048}$	$\frac{1}{1048}$

Erklärung verschiedener Erscheinungen durch die Gravitation.

Newton vermochte auch in der allgemeinen Gravitation die Ursache vieler Erscheinungen zu erblicken, deren enge Verbindung vor ihm niemand hätte ahnen können. Mehrere Ungleichheiten der Bewegung des Mondes in seiner Bahn, die retrograde Bewegung der Knoten dieser Bahn und die

Präzession der Tag- und Nachtgleichen waren schon den Astronomen des Altertums bekannt. Newton bewies, daß die Störungen der Mondbewegung durch die Verschiedenheit der von der Sonne auf die Erde und den Mond ausgeübten Anziehung veranlaßt seien. Aus der Rotation der Erde schloß er auf eine Abplattung derselben an den Polen und bestimmte auch die Größe des Anwachsens der Schwerkraft und der Länge eines Meridiangrades in der Richtung vom Äquator zu den Polen. Die Figur der Erde kann als eine mit dem Polarradius beschriebene Kugel betrachtet werden, an welche ein symmetrisch gebauter Ring angesetzt ist, der am Äquator am dicksten ist. Würde der Ring sich um die Erdachse ohne Reibung an der Kugel in 24 Stunden drehen, so müßte er infolge der Anziehung der Sonne, der gegenüber er sich ungefähr wie ein System von Satelliten verhält, eine Bewegung zeigen, die seine Knotenlinie (Durchschnittslinie von Äquator und Ekliptik) in ähnlicher Weise wie die der Mondbahn auf der Ekliptik verschiebt. Die Anziehung des Mondes wirkt in demselben Sinne und mit ungefähr doppelt so großer Kraft auf die Drehung der Ringebene ein. Durch die feste Verbindung mit der Kugel, deren Rotation durch Sonne und Mond nicht gestört werden kann, hat der Ring in dem Bestreben, die Lage seiner Knotenlinie zu ändern, noch das Beharrungsvermögen der rotierenden Kugel zu überwinden, wodurch die Knotenbewegung außerordentlich verlangsamt wird, so daß sie jährlich nur 50″ beträgt. Da einer der Knoten der Frühlingspunkt ist, bewirkt die retrograde Bewegung desselben eine jährliche Zunahme der Länge sämtlicher Gestirne um 50″, eine Erscheinung, die den Namen Lunisolarpräzession führt.

Newton war sich wohl bewußt, daß die Ausarbeitung einer Theorie der Planetenbewegungen auf Grund des Gesetzes der allgemeinen Gravitation außerordentlichen Schwierigkeiten begegnen werde. Die Keplerschen Gesetze wären nur dann strenge richtig, wenn die Sonne allein die Planeten anziehen würde. Die allgemeine Gravitation hat zur Folge, daß Richtung und Größe der momentanen Fallbeschleunigung eines Planeten von den Massen und jeweiligen Örtern der Sonne und aller anderen Planeten (mit Einschluß der Satelliten) abhängt. Die Bahnen der Planeten ändern daher fortwährend ihre Lage, Form und Dimension, und es ist nur der Geringfügigkeit der Massen sowie der stets bedeutenden Größe der gegenseitigen Entfernungen der Planeten zuzuschreiben, daß die Änderung der Bahnelemente für Jahrhunderte mit befriedigender Genauigkeit vorausberechnet werden können.

Newtons Principia.

Newton hat eine Darstellung seiner Untersuchungen und Entdeckungen in dem Werke „Principia mathematica philosophiae naturalis“ gegeben, das 1687 in London erschienen ist und durch die Menge neuer und tiefer Gedanken, die Wichtigkeit der Resultate und die Fülle von Anregungen zu weiterer Forschung unsere höchste Bewunderung verdient.

So einfach das Gesetz der allgemeinen Gravitation ist, so schwierig gestaltet sich dessen Anwendung auf die Bestimmung mehrerer zu einem Sy-

stem verbundener Körper. Probleme dieser Art vermochte Newton nur sehr unvollständig zu lösen, da die Infinitesimalrechnung, an deren Begründung er selbst hervorragenden Anteil genommen hat, noch nicht genügend ausgebildet war. Erst 50 Jahre nach dem Erscheinen der Principia wurden durch L. Euler und A. Clairaut die Arbeiten in Angriff genommen, die den Aufbau der Himmelsmechanik auf den von Newton geschaffenen Fundamenten einleiteten. Die Literatur über diesen Gegenstand ist seither außerordentlich angewachsen und verzeichnet eine Menge ausgezeichneter Leistungen, die einen immensen Fortschritt in der Behandlung der äußerst komplizierten Probleme der Störungsrechnung bekunden und einige wichtige Eigenschaften unseres Sonnensystems offenbarten.

Mechanik des Himmels.

Die Mechanik des Himmels umfaßt die Gesamtheit der Probleme, die sich bei Anwendung des Gravitationsgesetzes auf die Bestimmung der Figur und Bewegung der Himmelskörper darbieten.

Daß ein isolierter Körper, dessen Teile eine genügende Bewegungsfreiheit besitzen, aber nicht Bewegungen aufweisen, die zu einer Rotation des Körpers Veranlassung geben, unter dem Einfluß der Schwere sich zu einer Kugel zusammenballen muß, ist leicht einzusehen. Schon Aristoteles hatte die Kugelgestalt der (nach seiner Ansicht ruhenden) Erde aus der Wirkungsweise der Schwere gefolgert. Anders verhält sich die Sache bei einem rotierenden Körper. Die Rotation bedingt das Auftreten einer Fliehkraft, welche die Teile des Körpers von der Umdrehungsachse zu entfernen trachtet. Es tritt daher so lange eine Verschiebung der Teile ein, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist, der zur Voraussetzung hat, daß auf die an der Oberfläche gelegenen Teile keine Kräfte wirken, die eine Bewegung in peripherischer Richtung veranlassen. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn jedes Element der Oberfläche auf der Resultante der Schwer- und Fliehkraft senkrecht steht.

Die wahrscheinlichste Gleichgewichtsfigur rotierender Flüssigkeitsmassen ist das abgeplattete Rotationsellipsoid; unter Umständen kann aber auch ein 3-achsiges, um die kleinste Achse sich drehendes Ellipsoid, sowie ein aus diesem durch Hervortreten einer verhältnismäßig kleinen Masse (am Ende der großen Achse) gebildeter birnförmiger Körper mit den Gleichgewichtsbedingungen verträglich sein.

Figur der Himmelskörper.

Die Figur der Himmelskörper ist nicht ohne Einfluß auf die Bewegungen derselben, sofern es sich um ein System von zwei oder mehreren Körpern handelt. Ist die Rotationsgeschwindigkeit so klein, daß die Körper noch als kugelförmig angesehen werden können, so bleibt die Lage der Rotationsachsen unverändert, und es vollzieht sich die fortschreitende Bewegung jedes Körpers, wie wenn dessen ganze Masse im Schwerpunkte vereint wäre. Zwei derartige Körper bewegen sich daher in einem Kegelschnitt. Hat aber einer der Körper die Gestalt eines Ellipsoids, so tritt im allgemeinen eine Störung der Lage seiner Rotationsachse und eine Störung der Revolutionsbewegung des anderen Körpersein. Die Mechanik zeigt, wie die Bewegun-

Probleme der Mechanik des Himmels.

gen der Rotationsachse und der beweglichen Teile des Körpers mit Bezug auf dessen Schwerpunkt vor sich gehen, und in welcher Weise die Abweichung des Körpers von der Kugelgestalt (bei Rotationsellipsoiden die Abplattung) die Bewegung des umkreisenden Körpers beeinflußt. Bezüglich der Erde handelt es sich um die Theorien der (durch die Anziehung von Sonne und Mond veranlaßten) Präzession und Nutation, der Ebbe und Flut des Meerwassers und der Luft und der durch die Abplattung der Erde hervorgerufenen im Maximum 7″ bis 8″ betragenden Störung der Mondbewegung in Länge und Breite.

Bei nachträglicher Berücksichtigung der von der Abplattung herrührenden Störungen werden die relativen Bewegungen der zu einem System verbundenen Körper auf die ihrer Schwerpunkte zurückgeführt, in deren jedem die Masse des ganzen Körpers vereint zu denken ist.

Berechnung der Störungen.

In einem solchen System materieller Punkte hängen die Bewegungen nur von den Massen und den für irgendeine gemeinsame Epoche geltenden Koordinaten und Geschwindigkeiten der Punkte ab, so daß, wenn für jeden Punkt die Masse, die 3 Koordinaten und 3 Geschwindigkeitskomponenten gegeben sind, die Verteilung der Punkte in jedem früheren oder späteren Zeitpunkt durch das Gravitationsgesetz bestimmt wird. Die Differentialgleichungen der Bewegung sämtlicher Punkte sind leicht zu bilden; zur Integration derselben reicht aber der mathematische Apparat auch in seiner gegenwärtigen Ausbildung im allgemeinen nicht hin, wenn die Zahl der Punkte größer ist als 2. Schon das Dreikörperproblem ist daher nicht allgemein lösbar. Wird aber die Bewegung jedes Punktes hauptsächlich nur durch die Anziehung eines Punktes beeinflußt, so kann die leicht zu gewinnende Kenntnis der genäherten Bahnen zu deren sukzessiver Verbesserung benutzt werden. Dieser Fall trifft in unserem Sonnensystem zu, da die Bewegungen der Planeten um die Sonne und die der Satelliten um ihre Planeten nahezu in Ellipsen erfolgen. Ort, Größe und Richtung der Geschwindigkeit eines Planeten zu irgendeiner Zeit bestimmen die Elemente der Keplerschen Ellipse, welche der Planet beschreiben würde, wenn er in seiner weiteren Bewegung nur der Anziehung der Sonne unterworfen wäre. Den durch die Anziehung der übrigen Körper hervorgerufenen Änderungen des heliozentrischen Ortes und der heliozentrischen Geschwindigkeit kann daher jederzeit durch Änderung der ursprünglichen Bahnelemente um verhältnismäßig kleine Korrektionsglieder Rechnung getragen werden. Diese Änderungen werden Störungen genannt. Die Abhängigkeit derselben von den ursprünglichen Elementen und von den Massen und Bahnelementen der störenden Körper in analytischer Form auszudrücken, bildet eines der wichtigsten, aber auch schwierigsten Probleme der Himmelsmechanik, dessen Behandlung zwar keine vollständig befriedigende Lösung gebracht, aber doch dahin geführt hat, daß wir im Wege fortgesetzter Annäherungen die selbst im Laufe mehrerer Jahrhunderte angewachsenen Störungen noch mit erheblicher Genauigkeit zu bestimmen imstande sind.

Auf den Ergebnissen der Störungsrechnung beruhen die Tafeln zur Bestimmung der geozentrischen Bewegung der Sonne und des Mondes und der heliozentrischen Bewegung der Planeten (mit Ausschluß der Erde). Gegenwärtig bedient man sich gewöhnlich der Tafeln von S. Newcomb für Sonne, Merkur, Venus, Mond, Uranus, Neptun, jener von G. Hill für Jupiter, Saturn und für den Mond der Tafeln von P. Hansen.

Stabilität des Systems der großen Planeten.

Der Theorie der Störungen verdanken wir die Kenntnis einiger wichtiger Eigenschaften des Systems der großen Planeten. Hierher gehört vor allem die Unveränderlichkeit der großen Achsen der Planetenbahnen, womit gesagt sein soll, daß diese Achsen nicht fortschreitende, sondern nur kleine periodische Änderungen ihrer Größe erfahren, weshalb die Umlaufszeiten nur kleinen Schwankungen unterliegen können.

Exzentrizität und Neigung der Bahnen gegen eine feste Ebene zeigen im Laufe von Jahrtausenden größere Änderungen, ohne aber gewisse Grenzen überschreiten zu können. Als feste Ebene wird gewöhnlich die einer bestimmten Epoche entsprechende Ekliptik angenommen; die Grenzen für die Neigungen liegen besonders für die außerhalb der Marsbahn befindlichen Planeten viel enger, wenn man statt der Ekliptik die sogenannte „Unveränderliche Ebene“ wählt, die dadurch ausgezeichnet ist, daß mit Bezug auf sie die Summe der Projektionen der mit den Massen multiplizierten, von den Radienvektoren der Planeten überstrichenen Flächen jederzeit größer ist als mit Bezug auf irgendeine andere Ebene. Stockwell gibt folgende Grenzwerte an:

	Grenzen der Exzentrizität		Grenzen der Neigung gegen die Ekliptik für 1850		gegen die Unveränderliche Ebene	
Merkur	0.1215	0.2317	3° 47′	10° 36′	4° 44′	9° 11′
Venus	0.0000	0.0706	0 0	4 51	0 0	3 16
Erde	0.0000	0.0694	0 0	4 41	0 0	3 6
Mars	0.0185	0.1397	0 0	7 28	0 0	5 56
Jupiter	0.0255	0.0608	0 0	2 4	0 14	0 29
Saturn	0.0124	0.0843	0 0	2 36	0 47	1 1
Uranus	0.0118	0.0780	0 0	2 42	0 54	1 7
Neptun	0.0056	0.0145	0 0	2 23	0 34	0 47

Die Unveränderlichkeit der großen Achsen und die enge Begrenzung der Schwankungen von Exzentrizität und Neigung der Bahnen bedingen die Stabilität des Systems der großen Planeten, d. h. dessen Fortbestand unter nahe gleich bleibenden Verhältnissen für Hunderttausende von Jahren, sofern nur die gegenseitige Anziehung von Sonne und Planeten in Betracht kommt.

Der Glaube an einen harmonischen Bau des Planetensystems hat Kepler veranlaßt, nach gesetzmäßigen Beziehungen zwischen den Bahnhalbmessern der Planeten zu forschen. Das Ergebnis seiner mühevollen Arbeit im „Mysterium“ fand indessen wenig Beachtung, da es ein wirkliches Gesetz nicht enthielt

und die Abgeschlossenheit des Systems der 6 (alten) Planeten voraussetzte. Mehr Glück hatte Titius (Professor in Wittenberg), der eine sehr einfache Formel fand (1766), die zwar auch nicht der Ausdruck eines Gesetzes ist, aber den Plan der Reihung der Planeten ziemlich gut skizziert. Die Formel besagt, daß die mittleren Abstände der Planeten, wenn man den Erdbahnhalbmesser = 10 annimmt, durch Addition der Zahl 4 zu den Gliedern der gesetzmäßig fortschreitenden Reihe 0, 3, 6, 12, (24), 48, 96 ... erhalten werden. Der Umstand, daß an der durch den Abstand 24 + 4 = 28 bezeichneten Stelle kein Planet sich vorfand, gab zunächst Anlaß zur Frage nach der Existenz eines zwischen Mars und Jupiter gelegenen Planeten. Daß diese Frage zu bejahen sei, wurde allgemein angenommen, nachdem sich herausgestellt hatte, daß auch der Abstand des von W. Herschel (1781) entdeckten Planeten Uranus durch die Titiussche Formel (192 + 4) nahe richtig angegeben wird.

Asteroiden. Entdeckung der ersten kleinen Planeten.

Die Nachricht, daß am 1. Januar 1801 von Piazzi (Palermo) ein Planet gefunden wurde, dessen Bewegung mit der des vermuteten Lückenplaneten verträglich sei, erregte daher weniger Überraschung als Befriedigung. Der Planet, dem der Namen Ceres gegeben worden ist, hatte die Helligkeit eines Sternes 8. Größe und konnte nur während 6 Wochen beobachtet werden. Nun galt es für die Sicherung des neuen Planeten zu sorgen, die nur durch eine gute Bahnbestimmung erzielt werden konnte. Diese Aufgabe stellte sich C. F. Gauß, und es gelang ihm binnen kurzer Zeit, die Bahnelemente zu berechnen und daraus eine Oppositions-Ephemeride abzuleiten, welche die rasche Auffindung der Ceres ermöglichte.

Ceres konnte nicht lange als das einzige Bindeglied zwischen Mars und Jupiter angesehen werden, da der zweite der kleinen Planeten, Pallas benannt, schon im Jahre 1802 entdeckt worden ist. Die nächsten Jahre brachten noch zwei neue Funde, nämlich Juno (1804), Vesta (1807). Erst nach vier Dezennien (1845) folgte die Auffindung eines fünften Körpers dieser Gruppe (Asträa), und nun begann man auch systematisch nach weiteren Asteroiden zu suchen. Seit 1847 ist kein Jahr vergangen, das nicht neue, zuweilen sogar recht zahlreiche Entdeckungen kleinerer Planeten gebracht hätte. Besonders die Einführung der photographischen Methode durch M. Wolf hat die Auffindung dieser lichtschwachen Objekte sehr erleichtert. Als die erfolgreichsten Entdecker sind zu nennen: J. Palisa (Wien), Charlois (Nizza), M. Wolf (Heidelberg). Man bezeichnet die kleinen Planeten kurz durch eine der Reihenfolge ihrer Entdeckung entsprechende, in einen Ring geschlossene Nummer, so daß also ① oder auch (1) die Ceres, (4) die Vesta bedeutet.

Starkes Anwachsen der Zahl der Entdeckungen.

Gegenwärtig kennt man ungefähr 800 kleine Planeten, von denen die meisten auch zur Zeit ihrer Opposition kleiner sind als 10. Größe. Da es eine untere Grenze für die Größe kaum geben dürfte, ist die Zahl der vorhandenen Asteroiden als außerordentlich groß anzunehmen. Ihre Gesamtmasse ist jedenfalls sehr klein und kann die des Mars nicht viel übersteigen, da sie sich sonst in merklichen Störungen der Marsbahn äußern müßte. Die

Gesamtmasse.

Massen der bekannten Asteroiden machen zusammen wahrscheinlich noch nicht den 1000. Teil der Erdmasse aus.

Die Frage, ob die Asteroiden durch Zerstörung eines großen Planeten entstanden seien, ist noch als offen zu betrachten. Die berechneten Bahnen ergeben keinen Kreuzungspunkt, doch ist es immerhin möglich, daß das Versagen dieses Kriteriums den Bahnstörungen durch die Planeten zuzuschreiben ist. Es verdient jedenfalls Beachtung, daß sich verschiedene Gruppen bilden lassen, deren jede aus mehreren in sehr ähnlichen Bahnen kreisenden, kleinen Planeten besteht und durch Teilung eines Körpers entstanden sein könnte.

Intervall der Oppositionen.

Beobachtungen der Asteroiden sind nur in der Nähe der Zeit ihrer Opposition ausführbar. Das mittlere Intervall zwischen aufeinanderfolgenden Oppositionen, d. i. die synodische Umlaufszeit, ist die Zeit, in welcher der Winkel zwischen den Radiusvektoren der Planeten und der Erde von 0° bis 360° zunehmen würde, wenn beide Körper sich mit ihren mittleren Geschwindigkeiten in kreisförmigen Bahnen in derselben Ebene bewegten. Das Problem der Bestimmung dieser Zeit ist ungefähr dasselbe, wie das der Berechnung des Intervalls zwischen den Bedeckungen des kleinen Zeigers einer Uhr durch den großen. In einer Stunde bewegt sich der große Zeiger um 60, der kleine um 5 Teilstriche weiter, so daß die Vergrößerung des Winkels zwischen beiden Zeigern 55 Teilstriche beträgt. Das Intervall der Koinzidenzen setzt aber eine relative Bewegung um 60 Teilstriche voraus und ist daher gleich $\frac{60}{55}$ Stunden. Es sei nun wieder U die siderische Umlaufszeit eines kleinen Planeten, nach Jahren gemessen. In einem Jahre dreht sich der Radiusvektor der Erde um 360°, der des Asteroiden in demselben Sinne um $\frac{360^\circ}{U}$. Da U größer ist als 1, wird die jährliche relative Bewegung durch $360^\circ - \frac{360^\circ}{U}$ dargestellt. Damit diese Bewegung 360° betrage, ist daher die Zeit $\frac{360^\circ}{360^\circ\left(1-\frac{1}{U}\right)}$ nötig. Hierfür kann man auch schreiben $\frac{U}{U-1}$.

Die synodische Umlaufszeit des Planeten (1) Ceres ist, da $U = 4.603$, gleich 1.278 Jahre. Je größer die Umlaufszeit U wird, desto mehr nähert sich das Intervall zwischen den Oppositionen der Einheit, einem Jahre.

Ausdehnung des Asteroidenringes.

Die kleinste Halbachse (1.46) besitzt der Planet „Eros“, die größte (5.28) „Hektor“; die erstere ist kleiner als die des Mars (1.52), die letztere größer als die des Jupiter (5.20), so daß die Breite des Asteroidengürtels die der Zone zwischen den mittleren Bahnen von Mars und Jupiter um ein geringes übertrifft. Infolge der großen Exzentrizität (0.22) und kleinen Neigung (12°) seiner Bahn kann sich Eros unter allen bekannten Planeten der Erde am meisten nähern. Die größte Annäherung (bis auf 22 Millionen Kilometer) tritt ein, wenn der Periheldurchgang in die Zeit der Opposition fällt. Ein nahes Zusammentreffen dieser Momente wird im Jahre 1931 erfolgen und den Astronomen eine günstige Gelegenheit bieten, Positionsmessungen des

Eros zu einer voraussichtlich genaueren Bestimmung der Sonnenparallaxe zu verwerten.

Achillesgruppe. Während Eros durch die Kürze seiner Umlaufszeit sich von den übrigen Asteroiden wesentlich unterscheidet, teilt Hektor mit drei anderen Planeten, nämlich Achilles, Patroklus und Nestor die Eigenschaft, in großer Nähe der Jupiterbahn zu kreisen. Diese die Achillesgruppe bildenden Planeten sind besonders dadurch interessant, daß ihre Stellung ungefähr der Bedingung entspricht, die einen Spezialfall des Dreikörperproblems kennzeichnet. Denn soweit es nur auf die Anziehung von Sonne und Jupiter ankommt, muß ein Planet, der an einem Eckpunkte eines gleichseitigen Dreieckes steht, dessen andere Ecken durch Jupiter und die Sonne eingenommen werden, stets in derselben relativen Stellung zu diesen zwei Körpern verharren. Wenn die Bedingung nur angenähert erfüllt ist, wirken die Jupiterstörungen im Sinne einer Erzielung des stabilen Zustandes und veranlassen den Planeten zur Ausführung einer pendelartigen Bewegung um den Gleichgewichtspunkt, der gewöhnlich Librationspunkt genannt wird.

Für 1912 Juni 10 ergibt die Berechnung des heliozentrischen Winkels zwischen Jupiter und den Planeten der Achillesgruppe folgende Werte:

(588) Achilles	54° 27	(624) Hektor	54° 4
(617) Patroklus	− 61 11	(659) Nestor	78 1

Die Planeten (588), (624), (659) haben den Librationspunkt östlich von Jupiter, (617) jedoch hat denselben westlich. Nach der Störungstheorie soll sich der Planet Achilles höchstens bis zu 17 nach der einen oder anderen Seite vom Librationspunkte (60°) entfernen können, so daß sein heliozentrischer Abstand von Jupiter als zwischen den Grenzen 43° und 77° schwankend anzunehmen wäre. Der Unterschied der mittleren täglichen Bewegung dieser zwei Planeten soll kleiner bleiben als 8″; gegenwärtig beträgt er ungefähr 4″. Die Verfolgung des Laufes der jupiternahen Planeten wird eine erwünschte Kontrolle so manchen Resultats der Störungsrechnung liefern.

Lücken im Asteroidenringe. Die mittleren Abstände der kleinen Planeten sind nicht gleichmäßig abgestuft. Der Stufenwert ist an jenen Stellen auffallend groß, wo die Umlaufszeit eines supponierten Planeten in einfachem, durch kleine, ganze Zahlen ausgedrücktem Verhältnisse ($\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ . . .) zur Umlaufszeit des Jupiter steht. Es lag nahe, die Ursache dieser Erscheinung darin zu suchen, daß in diesen Fällen Jupiter, der überhaupt die größten Störungen der Asteroidenbahnen bewirkt, schon nach einem Umlaufe oder nach wenigen Umläufen wieder die ursprüngliche Stellung zum Asteroiden und dessen Bahn einnimmt, und durch die nach Ablauf einer bestimmten Periode in demselben Sinne erfolgenden Störungen den Asteroiden immer mehr von seiner anfänglichen Bahn abdrängt. Die Versuche, die Lücken im Ringe der kleinen Planeten so aus den Prinzipien der Mechanik des Himmels zu erklären, hatten aber nicht den erwarteten Erfolg, indem sich für die Bahnen angenommener Lückenplaneten nur periodische Änderungen der Halbachsen ergaben.

Kometen. Ansichten der Astronomen des Altertums.

Dem Laufe der Kometen wurde bis zum Ende des 16. Jahrhunderts nur wenig Beachtung geschenkt, da man fast allgemein der aus dem Altertum überkommenen Ansicht huldigte, daß die Kometen Gebilde seien, die dem Kosmos nicht angehören und daher auch keine gesetzmäßigen Bewegungen haben können. Zwar sollen sie von den Pythagoräern als Himmelskörper angesehen worden sein, die sich um die Sonne bewegen; dieselbe Meinung hatte der römische Philosoph Seneca, der glaubte, daß man über die Bewegung der Kometen nur wegen der Seltenheit ihres Erscheinens und der Größe ihrer Umlaufszeiten noch sehr wenig wisse und in nicht allzuferner Zeit durch fortgesetzte Beobachtungen hierüber belehrt werden würde. Die Vorherrschaft behielt jedoch stets die Aristotelische Lehre, nach welcher die Kometen atmosphärische Erscheinungen sind, hervorgerufen durch die Entzündung und Verbrennung von der Erde aufsteigender trockener Dünste in den oberen Luftregionen. Die Unhaltbarkeit dieser Lehre wurde erst offenbar, als Tycho Brahe aus seinen Beobachtungen den Beweis erbrachte, daß die in den Jahren 1577, 82, 85, 90, 93, 96 erschienenen Kometen keine merkliche Parallaxe besaßen und daher jedenfalls viel weiter als der Mond von der Erde entfernt gewesen sein mußten.

Form der Kometenbahnen.

Mit dieser Erkenntnis wuchs auch das Interesse der Astronomen an der Bewegung der Kometen. Kepler schloß aus den beobachteten Örtern zweier Kometen auf eine nahezu geradlinige Bahn. Hevel (1668) erkannte, daß man eine Krümmung der Bahn in der Nähe des Perihels annehmen müsse, und glaubte, daß die Bewegung der Kometen in einer Parabel oder einer der Parabel nicht unähnlichen Linie, die auch die Form einer Hyperbel haben könne, erfolge. Daß die Bahn des im Jahre 1664 erschienenen Kometen parabolisch sei, sprach zuerst Borelli (1665) aus. Beweiskräftig waren aber erst die Folgerungen, die Newton aus den Beobachtungen des großen Kometen vom Jahre 1680 zog. Pastor G. Dörfel (Plauen) stellte schon 1681 die Hypothese auf, daß dieser Komet sich in einer Parabel bewegt habe, und zwar so, daß die Sonne im Brennpunkte gestanden sei. Newton aber vermochte aus einigen Beobachtungen parabolische Bahnelemente abzuleiten, welche den beobachteten Lauf des Kometen so nahe richtig darstellten, daß über die Berechtigung der Annahme einer von der Einheit nur sehr wenig verschiedenen Bahnexzentrizität kein Zweifel mehr bestehen konnte. Nach der Methode Newtons berechnete dann E. Halley die parabolischen Bahnen von 24 in dem Zeitraume 1337—1698 beobachteten Kometen. Hierbei ergaben sich für drei in den Jahren 1531, 1607 und 1682 erschienene Kometen so nahe gleiche, auf eine Identität der Objekte hinweisende Bahnelemente, daß Halley den Spezialfall einer ausgesprochen elliptischen Bahn vor sich zu haben glaubte und eine Wiederkehr der Erscheinung für das Jahr 1759 in Aussicht stellte. Der Komet wurde in dem bezeichneten Jahre tatsächlich aufgefunden und ist der erste der als periodisch erkannten Kometen. Er führt seither den Namen Halleys und ist 1835 und 1910 wieder in die Sonnennähe gelangt. Bis jetzt sind mehr als

Parabolischer Typus vorherrschend.

300 Kometen bekannt geworden, deren Bahnen mit einiger Sicherheit berechnet werden konnten. Die meisten dieser Bahnen sind parabolisch geformt, d. h. die Exzentrizität derselben ist so nahe der Einheit gleich, daß eine Abweichung der Bahn von einer Parabel aus den Beobachtungen nicht konstatiert werden kann. Es ist aber nicht ausgeschlossen, daß unter den Kometen, deren Elemente als parabolisch angenommen worden sind, viele vorkommen, die nach Hunderten oder Tausenden von Jahren wiederkehren. Für etwa 50 Kometen sind elliptische Elemente gefunden worden, aber nur 20 Kometen wurden in mehr als einer Erscheinung beobachtet. Der Grund für den Mißerfolg der Auffindungsversuche mag entweder in der Unsicherheit der Bestimmung der Umlaufszeit und der hieraus resultierenden Ungenauigkeit der Aufsuchungsephemeriden oder in einem Zerfall des Kometenkörpers gelegen sein. Eine Teilung von Kometen ist schon öfters beobachtet worden. Ein klassisches Beispiel für die Wirkung solcher Vorgänge bietet der Bielasche Komet, der in vier Erscheinungen einfach gesehen worden ist, in den zwei darauffolgenden (1846, 1852) aber als Doppelkomet erschien und später nicht mehr gefunden werden konnte.

Stellung der Kometen zum Sonnensystem.

Nur sehr wenige Kometen bewegten sich der Rechnung gemäß in hyperbolischen Bahnen. Wenn wir von den störenden Einflüssen der Planeten absehen und die aus den Beobachtungen abgeleitete Bahn zur Bestimmung der Geschwindigkeit verwenden, mit welcher ein Komet in die Attraktionssphäre der Sonne eingetreten ist, so finden wir, daß diese Geschwindigkeit für Kometen mit parabolischen Bahnelementen gleich Null ist, für solche mit hyperbolischen Elementen aber einen endlichen Wert besitzt. Die überwiegende Mehrheit der Kometenbahnen bekunden den parabolischen Typus. Mit Rücksicht auf den Umstand, daß die Bahnachsen keine bestimmte Richtung bevorzugen, können wir daher annehmen, daß die meisten der sichtbar gewordenen Kometen einem System kosmischer Materie entnommen sind, das fast symmetrisch zur Sonne, aber in außerordentlich großen Entfernungen von ihr gelegen ist und sich in derselben Richtung und derselben Geschwindigkeit im Raume bewegt wie die Sonne. Es ist, wie neuere Untersuchungen gezeigt haben, sehr wahrscheinlich, daß ursprünglich alle Kometen derselben Hülle unseres Sonnensystems angehörten und bei ihrer Annäherung an die Sonne durch die Anziehung der Planeten eine Störung der parabolischen Bewegung in mitunter merklicher Weise erlitten haben. Die Parabel bildet den Übergang von der Ellipse zur Hyperbel. Bewirken die Störungen eine Vergrößerung der Bahngeschwindigkeit, so wird aus der Parabel eine Hyperbel, im entgegengesetzten Falle aber eine Ellipse. Jene Kometen, deren Bahnbestimmung auf hyperbolische Elemente geführt hat, besaßen schon bei ihrem Sichtbarwerden eine hyperbolische Geschwindigkeit. Die Rückwärtsrechnung der Störungen hat nun ergeben, daß die Bahnexzentrizitäten um so kleiner waren, je weiter die Kometen von der Sonne abstanden und Grenzwerten zustrebten, die im Hinblick auf die Unsicherheit der gesamten numerischen Rechnung mit der Einheit identifiziert werden konnten.

Elliptische Bahnen.

Die ursprünglich parabolische Bahn eines Kometen kann durch die Störungen der Planeten auch in eine elliptische verwandelt werden. Die Störungen wachsen im allgemeinen um so mehr an, je mehr sich der Komet einem der Planeten nähert und je länger er in dessen Nähe verweilt. Da die Planetenbahnen mit der Ekliptik einen kleinen Winkel einschließen, so haben Kometen, deren Bahnneigung gegen die Ekliptik groß ist, nur wenig Chancen, eine bedeutende Störung ihrer Bewegung zu erfahren, weil die Wahrscheinlichkeit einer großen Annäherung an einen Planeten gering ist und bei eintretender Proximität die Distanzänderung rasch vor sich geht. Je kleiner der spitze Winkel zwischen Kometenbahn und Ekliptik wird, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit für ein nahes Zusammentreffen des Kometen mit einem Planeten. Die Dauer gegenseitiger Nähe kann aber nur dann lange währen, wenn die Bewegung des Kometen rechtläufig ist, d. h. in demselben Sinne erfolgt wie die Planetenbewegungen. Kometen, die sich rückläufig bewegen, können nur bei sehr naher Begegnung mit einem Planeten ansehnliche Bahnstörungen erleiden.

Für die Richtigkeit dieser Betrachtungen spricht auch die Erfahrung, da unter den 20 Kometen, bei denen mindestens eine Wiederkehr beobachtet worden ist, nur einer (Halley) rückläufig ist und 16 Bahnneigungen besitzen, die kleiner sind als 30°. Die Umlaufszeiten dieser Kometen sind vorwiegend klein (zwischen 3 und 7 Jahren); die Bahnexzentrizitäten liegen zwischen den Grenzen 0.41 (Komet Holmes) und 0.97 (Komet Halley) und schließen sich nahe an die größte Exzentrizität der Planetenbahnen an, sofern man die kleinen Planeten berücksichtigt. Das Aphel der elliptischen Bahn kommt ungefähr dort zu liegen, wo die Störungen die größte Verminderung der Bahngeschwindigkeit bewirkt haben.

Kometenfamilien.

Bei der großen Mehrheit der Kometen, die sich in ausgesprochen elliptischen Bahnen bewegen, befindet sich das Aphel in der Nähe der Jupiterbahn. Die Umlaufszeiten dieser Gruppe, die mehr als 30 Kometen umfaßt und die Kometenfamilie des Jupiter genannt wird, schwanken zwischen 3 und 8 Jahren. Wenn auch Jupiter als der mächtigste unter allen Planeten die größte Eignung zum Einfangen von Kometen hat, muß doch mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß nicht alle direkt von Jupiter unserm Sonnensystem einverleibt worden sind, sondern aus einer geringeren Zahl von Mutterkometen entstanden, da bei dem losen Gefüge der Kometen eine Teilung derselben unter dem Einflusse der nach verschiedenen Richtungen wirkenden Anziehung von Sonne und Jupiter oder einem anderen Planeten leicht erfolgen kann. Von den Kometenfamilien der übrigen Planeten ist die des Uranus durch 2, die des Neptun durch 6 Individuen vertreten. Die Kometen 1862 III und 1889 III haben die Apheldistanzen 47.6 bzw. 49.8; es ist von mehreren Astronomen darauf hingewiesen worden, daß die Aphele dieser Kometen die Existenz eines Planeten vermuten lassen, dessen mittlere Entfernung von der Sonne ungefähr um die Hälfte größer ist als die Entfernung Neptuns.

Verwandte Kometen.

Von großem Interesse sind noch jene Kometen, die durch die Ähnlichkeit ihrer Bahnen die Hypothese eines gemeinsamen Ursprungs gerechtfertigt erscheinen lassen. Man kennt schon mehrere solcher Kometensysteme, unter denen das aus den retrograden, perihelnahen großen Kometen 1843 I, 1880 I, 1882 II und wahrscheinlich noch einigen anderen bestehende an erster Stelle genannt zu werden verdient. Als weitere Systeme können mit einiger Wahrscheinlichkeit gelten die Kometen 1742—1907 II; 1812—1884 I; 1815—1887 V; 1884 III—1892 V. Es besteht auch die Möglichkeit eines Zusammenhangs zwischen dem durch die Kürze der Umlaufszeit (3.3 Jahre) ausgezeichneten Enckeschen Kometen und dem Kometen 1907 VI (Wolf), da nach Backlund vor einigen tausend Jahren das Aphel des ersteren Kometen mit dem Perihel des letzteren sehr nahe zusammenfiel. Der gemeinsame Ursprung zweier Kometen wird durch die Ähnlichkeit der Bahnelemente noch nicht verbürgt; zum Nachweise desselben wäre es notwendig, die Bewegung der Kometen unter Berücksichtigung der planetarischen Störungen so weit nach rückwärts zu verfolgen, bis nicht nur die Bahnen, sondern auch die Kometen einander so nahe liegen, daß die Wahrscheinlichkeit der Existenz eines Vereinigungspunktes fast zur Gewißheit wird. Um den Vereinigungspunkt zu erhalten, müßte man auch die Massen der Kometen kennen, da deren gegenseitige Anziehung in der Nähe dieses Punktes sehr merkliche Bahnstörungen bewirken kann. Je größer die zwischen der Teilung und den ersten Beobachtungen des Kometen liegende Zeitstrecke ist, desto schwerer läßt sich der Nachweis eines gemeinsamen Ursprungs erbringen, da bei der Unbeständigkeit der Kometen anzunehmen ist, daß nach der Teilung noch ein weiterer mit einer Änderung der Bahn verbundener Verlust der Materie eingetreten sei. Sind die Bahnen der Teilkometen gut bestimmt und so gelegen, daß die Proximität der Kometen der Erscheinung derselben nicht allzuweit vorausgegangen ist, so kann man, wie es für den Bielaschen Kometen der Fall war, die Kometenmassen dadurch bestimmen, daß man durch passende Wahl derselben die Erzielung eines Vereinigungspunktes anstrebt. Kometen, welche den Bezirk unseres Planetensystems in parabolischen oder hyperbolischen Bahnen verlassen, kehren nicht mehr zur Sonne zurück und entziehen sich daher fernerer Beobachtung. Periodische Kometen sind als Bürger unseres Sonnensystems zu betrachten, im allgemeinen jedoch nur für eine beschränkte Zeit, da die planetarischen Störungen, welche die Elliptizität der Bahnen bewirkt haben, die Bahnen wieder zu parabolischen oder hyperbolischen machen können. Die beobachtete Bewegung der Kometen läßt sich infolge der Unbeständigkeit dieser Gebilde für lange Zeiträume überhaupt nur ausnahmsweise durch die Rechnung gut darstellen, soferne man nur die Anziehung der Sonne und Planeten berücksichtigt. Gewöhnlich ist man genötigt, eine von Zeit zu Zeit erfolgte Änderung der Elemente anzunehmen, die sich hauptsächlich in einer Beschleunigung oder Verzögerung der mittleren Bewegung äußert, deren Ursache nicht mit Sicherheit angegeben werden kann. Ein widerstehendes Mittel (meteorische Materie) be-

Unbeständigkeit der Kometenbahnen.

wirkt eine Beschleunigung (durch Verkleinerung der Bahnhalbachse), ein partieller Zerfall der Kometen je nach Umständen eine Beschleunigung oder Verzögerung. Die Vorausberechnung der Elemente, und darunter besonders die Perihelzeit, ist daher immer mit größerer Unsicherheit behaftet, als man nach den Grundlagen der Rechnung vermuten möchte. Für den Halleyschen Kometen, der eine relativ große Beständigkeit zu besitzen scheint, betrug der Fehler der auf Grund von Beobachtungen aus den Jahren 1759 und 1835 vorausberechneten Perihelzeit 3.4 Tage. In Anbetracht der großen Umlaufszeit (76 Jahre) des Kometen ist dieser Fehler nicht bedeutend, da eine geringfügige unbeachtet gebliebene Änderung der mittleren täglichen Bewegung während der Sonnennähe im Jahre 1835 denselben zu erklären vermag. Viel größere Fehler sind zu erwarten, wenn die elliptischen Elemente nur aus Beobachtungen berechnet sind, die während einer einzigen Erscheinung eines Kometen erhalten wurden. Die Grenzen, innerhalb deren die Fehler wahrscheinlich liegen, können durch einfache Rechnungsoperation aus den bei der Bahnbestimmung benutzten Daten ermittelt werden. Für den im Jahre 1815 von Olbers entdeckten Kometen ergab die Rechnung eine Umlaufszeit von 71.84 Jahren und als Fehlergrenze $\pm$ 1.6 Jahre. Im Jahre 1887 ist der Komet von Brooks zufällig aufgefunden worden. Der Lauf des Kometen in dieser Erscheinung zeigte, daß von den früher berechneten Elementen nur die Umlaufszeit einen erheblichen Fehler (0.81 Jahre) besaß, der aber noch völlig innerhalb der vorausbestimmten Unsicherheitsgrenze lag. Je größer die heliozentrische Bewegung eines Kometen in der zwischen den äußersten Beobachtungen liegenden Zeitstrecke ist, und je genauer die Beobachtungen sind, desto sicherer lassen sich die Elemente überhaupt bestimmen. Die Sicherheit der berechneten Umlaufszeit wächst dabei stärker als die der übrigen Elemente.

Unsicherheit der berechneten Umlaufszeit.

V. Die Bahnbestimmung. Die Mechanik des Himmels lehrt, wie man die Änderungen bestimmen kann, welche die Bahnelemente eines sich um die Sonne bewegenden Körpers durch die Anziehung der Planeten erleiden. Da diese Änderungen von den jeweiligen Bahnelementen abhängen und im allgemeinen nur bei Zugrundelegung sehr genäherter Elemente mit wünschenswerter Genauigkeit zu erhalten sind, so ist die Ausarbeitung einer vollständigen Theorie der Bewegung eines Planeten (Kometen) nur im Wege fortgesetzter Annäherung möglich. Der erste Schritt besteht in der Ableitung genäherter Elemente aus wenigen, aber auf einen kleinen Zeitraum verteilten Beobachtungen unter der Annahme, daß die Bahn in aller Strenge ein Kegelschnitt sei, in dessen einem Brennpunkte das Sonnenzentrum ruht. Der bewegte Körper wird als ein materieller Punkt von verschwindend kleiner Masse betrachtet, auf den nur eine Kraft wirkt, nämlich die Anziehung der im Sonnenzentrum vereinigt gedachten Masse der Sonne. Das Ziel der Bahnbestimmung bildet die Beschaffung einer gewissen Anzahl von Konstanten, den sogenannten Bahnelementen, die alle Daten enthalten müssen, deren

man bedarf, um den heliozentrischen Ort des den gemachten Annahmen gemäß sich bewegenden materiellen Punktes für jede beliebige Zeit berechnen zu können. Dieses Erfordernis ist erfüllt, wenn die räumliche Lage und die Gestalt des Kegelschnittes gegeben sind und überdies die Zeit bekannt ist, in welcher sich der bewegte Körper in einem bestimmten Punkte des Kegelschnittes befindet.

Erklärung der Bahnelemente.

Zur Präzisierung der Bahnlage sind drei Elemente nötig, die auf die Ekliptik und den Frühlingspunkt bezogen zu werden pflegen. Denken wir uns, um die für die Auswahl der Elemente maßgebenden Gesichtspunkte besser zu überblicken, auf die Sonne versetzt, so würde der Planet (Komet), da dessen Bahnebene durch die Sonne gehen soll, sich in einem, die Erde (den Fall einer Koinzidenz der Bahnebenen ausgenommen) in einem anderen größten Kreise der Himmelssphäre zu bewegen scheinen. Diese Kreise schneiden sich in zwei diametral gegenüberliegenden Punkten der Sphäre, den Knoten der Bahn, die sich dadurch unterscheiden, daß der eine, der aufsteigende Knoten, vom Planeten beim Übertritte aus der den Südpol enthaltenden, durch die Ekliptik begrenzten Hemisphäre in die nördliche Hemisphäre passiert wird, wogegen der andere, der niedersteigende Knoten, in entgegengesetzter Richtung durchlaufen wird. Kennt man die Lage eines Knotens in der Ekliptik und den an diesem Knoten auftretenden Winkel zwischen den Richtungen der scheinbaren Bewegung von Erde und Planet, so ist man über die Lage des die scheinbare Bahn des Planeten darstellenden Kreises zur Ekliptik vollständig orientiert. Es ist allgemein üblich, die Lage der Knoten durch die Angabe der Länge (Ω) des aufsteigenden Knotens festzustellen; der Winkel, unter dem die Kreise sich schneiden, heißt die Neigung (i) der Bahn. Wenn die heliozentrischen Längen des Gestirnes bei fortschreitender Zeit wachsen (direkte Bewegung), ist i ein spitzer Winkel, bei abnehmender Länge (retrograde Bewegung) ein stumpfer Winkel. Die Elemente Ω, i bestimmen also nicht nur die Lage des Kreises, in dem die scheinbare Bewegung des Planeten vor sich geht, sondern auch die Richtung der Bewegung. Eine in der Ekliptik liegende Bahn hat entweder $i = 0°$ oder $i = 180°$; im ersten Falle ist die Bewegung direkt, im zweiten retrograd. In beiden Fällen gäbe es keinen Knoten, und es hätte daher Ω keine Bedeutung. Je näher i diesen Grenzen liegt, desto unsicherer fällt die Bestimmung von Ω aus, d. h. desto geringeren Einfluß hat ein Fehler in Ω auf die heliozentrischen Koordinaten des bewegten Körpers.

Wäre die wahre Bahn ein Kreis, so bedürfte es zur Feststellung seiner Lage keines weiteren Elementes. Alle anderen Kegelschnitte aber haben nur eine durch den Brennpunkt gehende Symmetrieachse, die große Achse des betreffenden Kegelschnittes, deren Lage in der scheinbaren Bahn bekannt sein muß, weil die Geschwindigkeit der Bewegung vom Winkel abhängt, den der Radiusvektor mit ihr einschließt. Da diese große Achse des Kegelschnittes durch den dem Brennpunkte zunächst gelegenen Punkt der Kurve, das Perihel, hindurchgeht, geschieht die Orientierung des Kegel-

schnittes in der Ebene der Bahn am zweckmäßigsten durch die Angabe der Lage des Punktes der Sphäre, auf den der dem Perihel zukommende, kürzeste Radiusvektor hinweist. Um diesen Punkt zu finden, braucht man nur seinen Abstand (ω) vom aufsteigenden Knoten zu kennen. Das Element ω ist der heliozentrische Winkel, um den die von der Sonne zum aufsteigenden Knoten gezogene Linie im Sinne der Bewegung des Gestirnes gedreht werden muß, um das Perihel in sich aufzunehmen.

Die Gattung des Kegelschnittes hängt nur von einer Konstanten, nämlich der Exzentrizität (e) ab. $e = 0$ definiert den Kreis, $0 < e < 1$ die Ellipse, $e = 1$ die Parabel und $e > 1$ die Hyperbel. Wird nun noch die Perihel-distanz (q) angegeben, die beim Kreise mit dem Radius identisch ist, so ist auch die Größe des Kegelschnittes vollständig bestimmt. Für die Ellipse wird statt q gewöhnlich die große Bahnhalbachse (a) angegeben, die mit q durch die Gleichung $q = a(1 - e)$ verbunden ist und in einfacher Beziehung zur Umlaufszeit (U) steht, da — abgesehen von den Massen m — in Jahren ausgedrückt $U = a^{\frac{3}{2}}$ ist.

Die Verbindung zwischen Ort und Zeit wird gewöhnlich durch die Angabe der Perihelzeit (τ) hergestellt. Für eine Kreisbahn wäre anzugeben, welchen Abstand vom aufsteigenden Knoten der Planet zu einer bestimmten Zeit hat, eventuell die Zeit der Passage dieses Knotens.

Zur Bestimmung der sechs Elemente (Ω, i, ω, e, q, τ) ist die Kenntnis von sechs auf bekannte Zeitmomente bezogenen Beobachtungsdaten notwendig. Die Bestimmung würde sich am einfachsten gestalten, wenn die drei heliozentrischen Koordinaten und die drei Komponenten der Geschwindigkeit des Planeten (Kometen) für einen gegebenen Zeitpunkt bekannt wären. Das Problem ist aber auch dann noch leicht in aller Strenge zu lösen, wenn statt der Geschwindigkeitskomponenten die drei heliozentrischen Koordinaten für einen zweiten Zeitpunkt gegeben sind; oder was bei der Leichtigkeit der Verwandlung geozentrischer in heliozentrische Örter auf dasselbe hinauskommt, wenn zwei vollständige geozentrische Örter bekannt sind. Der Beobachter kann jedoch nur den Ort an der Sphäre angeben, in dem sich das Objekt befindet, nicht aber dessen Entfernung. Der sphärische Ort wird durch zwei Koordinaten (Rektaszension und Deklination oder Länge und Breite) bestimmt. Es müssen daher drei Beobachtungen der Bahnbestimmung zugrunde gelegt werden. Bei Voraussetzung einer parabolischen Bahn ($e = 1$) genügen fünf Daten, bei der einer Kreisbahn ($e = 0$, ω gegenstandslos) vier; im letzten Falle reichen also zwei Beobachtungen zur Bahnbestimmung aus. Bahnbestimmung.

Die Entwicklung der zur Lösung eines Problems dienenden Methoden hängt in der Regel von der Aktualität des Problems ab. Bis zur Entdeckung des ersten der kleinen Planeten war das Bedürfnis nach einer Methode der Bahnbestimmung aus wenigen Beobachtungen nur durch das Erscheinen von Kometen veranlaßt. Schon Newton hat einen Weg zur Bestimmung para- Newton.

bolischer Elemente gezeigt. Seine Methode, die in der Hauptsache eine graphisch-konstruktive ist, leistete der Wissenschaft sehr gute Dienste, war aber doch zu umständlich, als daß sie sich auf die Dauer hätte behaupten können. Das Bestreben der Astronomen, die Methode Newtons durch eine bessere zu ersetzen, blieb lange Zeit ohne Erfolg. Erst in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts vermochte J. H. Lambert einen wirklichen Fortschritt in der Behandlung des Kometenproblems anzubahnen. Lambert hat aus den Gesetzen der Zentralbewegung einige für die Bahnbestimmung sehr wichtige Relationen abgeleitet und als erster eine Gleichung zur Bestimmung der heliozentrischen Entfernung des Kometen für die Zeit der mittleren Beobachtung aufgestellt. Er war aber nicht imstande, seine Errungenschaften für die Bahnbestimmung genügend zu verwerten.

Bestimmung einer parabolischen Bahn.

Eine vollständige, den Anforderungen von Theorie und Praxis in vorzüglicher Weise entsprechende Lösung des Problems der Bestimmung einer parabolischen Bahn gelang erst H. W. Olbers, dessen Abhandlung „Über die leichteste und bequemste Methode, die Bahn eines Kometen aus einigen Beobachtungen zu berechnen“ (Weimar 1797) noch heute den vielsagenden Titel rechtfertigt. Die Olberssche Methode beruht auf der bei kleinen Zwischenzeiten nahe richtigen Voraussetzung, daß in jeder Bahn die Sehne zwischen den äußeren Örtern des bewegten Körpers durch den von der Sonne zum mittleren Orte führenden Radiusvektor so geteilt wird, daß die beiden Abschnitte sich zueinander verhalten wie die Zwischenzeiten. Aus dieser für die Kometen- und Erdörter gemachten Annahme läßt sich, wie schon Lambert gezeigt hat, das Verhältnis der geozentrischen Distanzen ρ, ρ' des Kometen für die Zeit der ersten und dritten Beobachtung direkt bestimmen. Olbers tat aber noch einen wichtigen Schritt, indem er aus dem Verhältnisse der Distanzen diese selbst so bestimmte, daß die zwischen der ersten und dritten Beobachtung liegende Zeit der zur parabolischen Bewegung des Kometen vom ersten zum dritten Orte nötigen Zeit gleich wird. Hierzu diente ihm die Eulersche Gleichung, welche die heliozentrischen Distanzen r, r' des Kometen in den Zeitmomenten t, t' und die zu r, r' gehörige Sehne s des vom Kometen durchlaufenen Bogens mit dem Intervall $t' - t$ verbindet und lautet $(r + r' + s)^{\frac{3}{2}} \mp (r + r' - s)^{\frac{3}{2}} = 6\, k\, (t' - t)$, wo bei ersten Bahnbestimmungen fast immer das obere, für eine weniger als 180° betragende heliozentrische Bewegung des Kometen gültige Vorzeichen zu nehmen ist. k bedeutet die mittlere tägliche Bewegung der Sonne. Die geozentrischen Distanzen ρ, ρ' erhält man durch indirekte Rechnung, indem man z. B. für ρ einen Wert annimmt, der mittels des bekannten Verhältnisses $\frac{\rho'}{\rho}$ zum zugehörigen Werte von ρ' führt. Nun sind zwei geozentrische Örter des Kometen gegeben, aus denen die heliozentrischen Örter und mithin auch r, r', s gefunden werden. Die Einsetzung dieser Werte in die Eulersche Gleichung wird einen Unterschied zwischen den Werten der linken und rechten Seite der Gleichung ergeben, der durch fortgesetzte Änderung in der

Olbers.

Annahme über ρ zum Verschwinden gebracht werden muß. Ist dies erreicht, so entsprechen ρ, ρ' den Anforderungen des Problems.

Bestimmung einer elliptischen Bahn.

Von dem Problem der Bahnbestimmung ohne eine Voraussetzung über die Exzentrizität haben J. L. Lagrange (1778) und P. S. Laplace (1780) elegante, analytische Lösungen gegeben, die jedoch für die astronomische Praxis nur geringe Bedeutung erlangten. Lagrange gründet seine Methode auf drei Beobachtungen und gelangt durch Entwicklung der Dreiecksflächen (Sonnenort, Kometenörter) nach Potenzen der Zwischenzeiten mittels eines passend gewählten Eliminationsverfahrens zu einer Gleichung 8. Grades, die zur Bestimmung des Radiusvektors des Kometen für die Zeit der mittleren Beobachtung dient. Nach Auflösung der Gleichung wird sofort ein heliozentrischer Ort und nach kurzer Rechnung auch Größe und Richtung der heliozentrischen Geschwindigkeit bekannt, worauf die Elemente leicht berechnet werden können. Die Lagrangesche Methode ist in neuester Zeit (1911) von C. V. L. Charlier ausgestaltet und in praktischer Hinsicht vervollkommnet worden.

Lagrange.

Laplace.

Bei der Methode von Laplace sind schon die Grundlagen so gewählt, daß die Bestimmung der heliozentrischen Koordinaten und Geschwindigkeitskomponenten für eine gegebene Zeit möglichst einfach wird. Die Methode ist nämlich nur dann anwendbar, wenn aus dem Komplex der Beobachtungen für irgendeinen Zeitpunkt außer dem sphärischen Ort des Kometen (Planeten) auch die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Ortsänderung abgeleitet werden können. Sind diese Größen bekannt, so erhält man ohne große Mühe die drei Koeffizienten einer aus vier Gliedern bestehenden Gleichung 8. Grades, die r (heliozentrische Distanz) finden läßt. Zu dem nun leicht zu ermittelnden heliozentrischen Orte erhält man aus drei linearen Gleichungen die Geschwindigkeitskomponenten. In der Praxis hat sich diese elegante Methode nicht bewährt, da die Grundlagen der Rechnung nur in seltenen Fällen mit wünschenswerter Genauigkeit bestimmbar sind.

Diese Methoden scheinen lange Zeit ganz unbeachtet geblieben zu sein. Denn als nach der Entdeckung (1801) des ersten Asteroiden (Ceres) an die Astronomen die Aufgabe herantrat, eine Bahnbestimmung praktisch durchzuführen, blieben die gewiesenen Wege ungenützt. Die Sicherung dieses teleskopischen Objektes ist K. F. Gauß zu verdanken, der, kaum 24 Jahre alt, in durchaus selbständiger Weise sich ein Verfahren zur Bahnbestimmung aus einigen Beobachtungen zurechtgelegt hatte und mit Erfolg praktisch zu verwerten wußte. Gauß hat sein Verfahren so lange geheim gehalten, bis er es unter Verwertung der bei der Berechnung der Bahnen von Pallas, Juno, Vesta gewonnenen Erfahrungen zu einer äußerst zweckmäßigen, formvollendeten Methode ausgebildet hatte. Die Veröffentlichung geschah in seinem epochemachenden Werke „Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium, Hamburg 1809“, das als Lehrbuch der Bahnbestimmung auch heute noch in unvermindertem Ansehen steht. Gauß drückt die Bedingung, daß die drei heliozentrischen Örter des Planeten (Kometen)

Gauß.

in einer durch die Sonne gehenden Ebene liegen sollen, durch drei Gleichungen aus, die nur die Verhältnisse der Dreiecksflächen und die drei geozentrischen Entfernungen (ρ_1, ρ_2, ρ_3) des Planeten als Unbekannte enthalten. Die Elimination von ρ_1 und ρ_3 führt zu einer Gleichung zwischen ρ_2 und den Verhältnissen der Dreiecksflächen, die in erster Annäherung durch die bekannten Zwischenzeiten und die 3. Potenz der unbekannten heliozentrischen Entfernung r_2 dargestellt werden können, so daß eine Gleichung zwischen ρ_2 und r_2^3 resultiert. In dem aus den Örtern der Sonne, des Planeten und der Erde für die Zeit der zweiten Beobachtung gebildeten Dreiecke ist der an der Erde auftretende Winkel sowie die Seite Sonne—Erde bekannt. Wählt man den von ρ_2 und r_2 am Planeten eingeschlossenen Winkel (z) als neue Unbekannte, so erhält man, da ρ_2 und r_2 durch diese ausgedrückt werden können, eine Gleichung zur Bestimmung von z. Die Auflösung dieser Gleichung gibt z, wodurch ρ_2 und dann ρ_1, ρ_3 bekannt werden. Nun sind alle geozentrischen Örter vollständig bestimmt, und man braucht bloß die beiden äußeren Örter in heliozentrische zu verwandeln und daraus die Elemente zu berechnen. Die Gaußsche Methode, die für das allgemeine Bahnbestimmungsproblem ungefähr dieselbe Bedeutung besitzt wie die Olberssche Methode für das einfachere Kometenproblem, ist noch gegenwärtig in fast allgemeinem Gebrauch. Es sind an ihr im Laufe der Zeiten zwar nicht unerhebliche Verbesserungen angebracht worden, die jedoch das Wesen der Methode unberührt gelassen haben.

Bahn des Uranus.

Nachdem genäherte Bahnelemente des Planeten Uranus bekannt geworden waren und hierdurch die Möglichkeit vorlag, die Bahn dieses dem freien Auge gerade noch sichtbaren Gestirns nach rückwärts zu verfolgen, wurden Nachforschungen nach zufällig noch vor der Entdeckungsepoche (1781) gemachten Positionsbestimmungen angestellt, die das Ergebnis hatten, daß Uranus in der Zeit von 1690 bis 1781 zwanzigmal beobachtet, aber für einen Fixstern gehalten worden war. Wenn auch diese Beobachtungen, und darunter besonders die ältesten, keine große Genauigkeit besaßen, so waren sie doch wegen ihrer Verteilung über einen ganzen Umlauf des Planeten für die Bahnbestimmung sehr wichtig. Bouvard, der um das Jahr 1820 die Ausarbeitung einer Theorie der Bewegung des Uranus unter Berücksichtigung der Jupiter- und Saturnstörungen in Angriff nahm, vermochte nicht eine Bahn zu finden, die sich sowohl den alten als auch den neuen zwischen 1781 und 1820 erhaltenen Beobachtungen befriedigend anschloß, und gründete infolgedessen seine Theorie bloß auf die neuen Beobachtungen. Die Bouvardschen Tafeln des Uranus wiesen schon nach kurzer Zeit bedeutende Fehler auf und gaben hierdurch Anlaß zur Prüfung des von Bouvard angewandten Verfahrens. Der große deutsche Astronom F. Bessel äußerte sich in einem 1840 in Königsberg gehaltenen und in seinen nachgelassenen Papieren aufgezeichneten Vortrage, daß er die von Bouvard ausgeschlossenen Beobachtungen einer scharfen Kritik und einer neuen Berechnung unterworfen habe, wodurch er die volle Überzeugung gewann, daß die „vor-

Anscheinende Unvereinbarkeit der alten und neuen Beobachtungen.

Ansicht Bessels.

handenen, bis zu einer ganzen Bogenminute reichenden Unterschiede zwischen Beobachtung und Rechnung keineswegs den Beobachtungen zuzuschreiben sind und nur in einer neuen physischen Entdeckung ihre Erklärung finden können. Zweifel an der Richtigkeit der Anziehungslehre seien nicht statthaft; wahrscheinlich wird gerade diese Lehre die Abweichungen erklären, indem sie zugleich eine Entdeckung im Sonnensystem bringen wird. Fernere Versuche der Erklärung werden nämlich die Absicht verfolgen, einem unbekannten Planeten jenseits des Uranus, der vielleicht wegen zu großer Lichtschwäche nicht sichtbar ist, eine Bahn und eine Masse anzuweisen, welche so beschaffen sind, daß daraus Störungen des Uranus hervorgehen, welche die jetzt nicht vorhandene Übereinstimmung seiner Beobachtungen herstellen. Eine Bestätigung des Daseins des neuen Planeten würde durch dessen voraussichtlich nachweisbare Störungen auf die Bahn des Saturn sich ergeben." Bessels prophetische Worte sollten bald in Erfüllung gehen, jedoch nicht bevor der Mund, der sie gesprochen, sich für immer geschlossen hatte (17. März 1846). Im Sommer 1845 begann Leverrier seine berühmt gewordenen Untersuchungen, welche zunächst den Zweck verfolgten, den ganzen beobachteten Lauf des Planeten unter Berücksichtigung der bekannten Störungen möglichst gut darzustellen, und insoweit ein günstiges Ergebnis hatten, als die Längen der 26 durch Zusammenfassung von ungefähr je 10 Beobachtungen gebildeten Normalörter von den berechneten Längen nur im Betrage bis höchstens 20″ abwichen, während die Unterschiede in den Breiten ganz unbedeutend waren. Leverrier erkannte, daß die Fehler in Länge noch immer weit außerhalb der Unsicherheitsgrenzen der Beobachtungen lagen, und suchte nun, ganz im Sinne der Besselschen Ausführungen, von denen er jedoch wahrscheinlich keine Kenntnis hatte, Masse und Bahn des störenden Planeten zu bestimmen. Da auch darauf Rücksicht zu nehmen war, daß die Einführung neuer Störungen eine Änderung der bereits erhaltenen Elemente der Uranusbahn bedingt und daher das Problem der Bahnbestimmung mit einer großen Zahl von Unbekannten belastet, sah sich Leverrier veranlaßt, eine die Lösung des Problems vereinfachende Annahme zu machen. Diese besteht in der durch die Analogie mit den Bahnen der äußeren Planeten und durch die gute Darstellung der Breiten des Uranus gerechtfertigten Voraussetzung einer verschwindend kleinen Bahnneigung des störenden Planeten. Leverrier hätte sein Ziel viel leichter erreichen können, wenn er die weitere Annahme einer Kreisbahn gemacht hätte, die in Anbetracht der geringen, im Mittel nur 0.06 betragenden Exzentrizität der Bahnen von Jupiter, Saturn und Uranus ebenfalls sehr plausibel erscheinen mußte. Er hielt es jedoch für angezeigter, keine Unbekannte, die er bestimmen konnte, unbestimmt zu lassen. Als Näherungswert für die Bahnhalbachse wurde die doppelte Entfernung des Uranus angenommen.

Berechnung der Masse und Bahn eines Planeten durch Leverrier.

Leverrier begegnete im Laufe der Rechnung manchen Schwierigkeiten, die nicht so sehr in der Natur des Problems als in der Unsicherheit der

numerischen Bestimmung der Unbekannten gelegen waren, und gelangte erst nach zweckmäßiger Änderung des Operationsplanes zu Elementen, welche eine im allgemeinen befriedigende Darstellung sämtlicher Normalörter des Planeten Uranus ergaben. Die Mitteilung des Massenwertes und der Bahnelemente des neuen Planeten an die Pariser Akademie erfolgte am 31. August 1846. Nun galt es die Aufsuchung des Planeten zu betreiben. Mit den Pariser Fernrohren durfte man kaum hoffen, den Planeten an seiner Scheibenform zu erkennen; geeignete Sternkarten waren nicht zur Hand. In Paris muß es wohl bekannt gewesen sein, daß in Berlin neue Sternkarten angefertigt wurden, da einige hiervon schon ausgegeben waren. Und so schrieb Leverrier am 18. September 1846 an Galle einen Brief, worin er ihn nach einigen Worten des Dankes für die Übersendung einer Abhandlung mit der Position des Planeten bekannt machte und um dessen Aufsuchung bat. Galle erhielt den Brief am 23. September und äußert sich über das Weitere folgendermaßen: „Ich war damals alleiniger Assistent der Berliner Sternwarte; d'Arrest war Studiosus der Astronomie, wohnte aber in einem Nebengebäude der Sternwarte. Als ich ihm von dem Brief Mitteilung machte, sprach er den Wunsch aus, am Abend an der Beobachtung teilnehmen zu dürfen. Die Durchmusterung der betreffenden Himmelsgegend nach einem Planeten von merklichem Durchmesser führte zu keinem Ziele. Es mußte also an eine Sternkarte oder Zeichnung gedacht werden. Dabei äußerte d'Arrest, daß vielleicht unter den Berliner akademischen Sternkarten die betreffende Stelle schon sich befinden könnte. Wir gingen dieserhalb in das Zimmer Enckes (Direktor), wo diese Sternkarten lagen, und in der Tat fand sich ein Abdruck der Sternkarte von Bremiker, hora XXI, die eben erst in Berlin fertig geworden und im Buchhandel noch nicht ausgegeben war. Mit dieser Karte kehrte ich zu dem Refraktor zurück und fand nach einigen Vergleichungen jener Himmelsgegend den betreffenden Stern 8. Größe, den ich dann auch d'Arrest zeigte. Auch Encke nahm Kenntnis davon; die Bewegung konnte jedoch erst in der folgenden Nacht mit Sicherheit konstatiert werden."

Auffindung des Planeten Neptun durch J. G. Galle.

Wenn auch der Ruhm der theoretischen Entdeckung des unter dem Namen Neptun bekannten Planeten unstreitig Leverrier gebührt, so muß doch auch das Verdienst J. Adams' anerkannt werden, der schon im Oktober 1845 genäherte und anfangs September 1846 sehr befriedigende Elemente des Planeten dem Direktor der Greenwicher Sternwarte G. B. Airy bekannt gegeben hatte. Die Veröffentlichung erfolgte aber erst nach der am 13. November 1846 gemachten Mitteilung der Resultate an die Astronomische Gesellschaft in London. Die Untersuchung Adams' ist nicht so eingehend geführt wie die Leverriers. Nach den Arbeiten Adams' liegt der Ort des Planeten von der durch Galle beobachteten Position um $2°27'$, nach denen Leverriers aber nur um $52'$ ab.

Die Elemente, zu denen diese Forscher gelangt sind, befinden sich in naher Übereinstimmung, weichen jedoch von den wahren bedeutend ab:

	Beobachtung	Leverrier	Adams
Bahnhalbachse	30.05	36.15	37.25
Exzentrizität	0.0088	0.1076	0.1206
Länge des Perihels	47° 12′	284° 6′	299° 11′
$\frac{\text{Masse Neptuns}}{\text{Masse der Sonne}}$	0.000051	0.000107	0.000150

Es erscheint auf den ersten Blick verwunderlich, daß so verschiedene Systeme, wie die zwei ersten, sowohl die Störungen für die Zeiten der von Leverrier benutzten Beobachtungen als auch den Ort des Planeten für die Entdeckungszeit nahe richtig darstellen können. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, daß die Störungen nur in der Nähe der Konjunktion (1651, 1822) des Uranus und Neptun, jedesmal während etwa 40 Jahren von Bedeutung sind und innerhalb des Zeitraumes von 1690 bis 1800 fast gar nicht zur Geltung kommen. Von 1800 bis 1845 erreichen die Fehler in Länge nur 5°, in Entfernung etwa $\frac{1}{14}$ der wahren Entfernung. Deshalb ist die Richtung der störenden Kräfte nur wenig fehlerhaft angenommen, die Intensität allerdings etwas zu klein; dieser Fehler wird aber durch die größer angenommene Masse Neptuns teilweise kompensiert.

Die Auffindung Neptuns wurde durch den Umstand sehr erleichtert, daß die Nachforschung in eine Zeit fiel, wo der Fehler des aus den Leverrierschen Elementen berechneten Ephemeridenortes sehr klein war; schon 10 Jahre früher oder später hätte dieser Fehler eine solche Größe erreicht, daß die Aufsuchung des Planeten wahrscheinlich erfolglos geblieben wäre.

Die Beobachtungen Neptuns ergaben, daß dessen mittlere Entfernung von der Sonne viel kleiner ist, als sie nach der Titiusschen Regel sein sollte. Man dachte nun daran, daß es noch andere Planeten geben könne, die sich nicht in die Titiussche Regel einfügen lassen, und fand auch bald verschiedene Anzeichen für das Vorkommen von Planeten innerhalb der Merkurbahn. Die Frage nach dem Vorhandensein intramerkurieller Planeten erhielt eine große Bedeutung durch die Untersuchungen Leverriers, welche dargetan hatten, daß die säkulare (in einem Jahrhundert erfolgende) Bewegung des Perihels der Merkurbahn um 40″ größer ist, als sie nach der auf das genaueste durchgeführten Rechnung sein sollte. Diese säkulare Beschleunigung der Perihelbewegung läßt sich durch die Annahme eines oder mehrerer Planeten innerhalb der Merkurbahn sehr gut erklären. Es sind auch schon oft Notizen über den Vorübergang dunkler Körper vor der Sonnenscheibe erschienen, die aber einerseits wegen der Unerfahrenheit der Beobachter, andererseits wegen der Unwahrscheinlichkeit, daß derartige Phänome, die sich nicht selten wiederholen müßten, der Wahrnehmung berufener Forscher stets entgangen sein sollten, nicht glaubwürdig sind. Es hat auch die systematische Suche nach intramerkuriellen Planeten bei Gelegenheit totaler Sonnenfinsternisse nie Erfolg gehabt. Für die Annahme sonnennaher, unbekannter Planeten liegt ein triftiger Grund überhaupt nicht vor, da die

Frage nach der Existenz intramerkurieller und transneptunischer Planeten.

erwähnte Störung der Merkurbahn durch eine bekannte Erscheinung (siehe Zodiakallicht) vollständig erklärt werden kann. Dagegen läßt sich mit einiger Berechtigung erwarten, daß in größeren Entfernungen von der Sonne verhältnismäßig kleine Planeten noch zu finden sein werden. Prof. Forkes hat aus den Apheldistanzen etlicher Kometen auf die Existenz zweier Planeten in den Entfernungen 100 und 300 von der Sonne geschlossen. Die Apheldistanzen der Kometen 1862 III und 1889 III sind 47.6 und 49.8. Ein Planet, dessen Abstand von der Sonne ungefähr 50 mal größer ist als der Erdbahnradius, würde das nahe Zusammentreffen der Aphele erklären. Eine nahe gleiche Entfernung von der Sonne müßte nach den Rechnungen von Prof. Todd und W. H. Pickering der Planet haben, der die noch unerklärten, allerdings sehr kleinen Störungen der Bewegung des Uranus verursachen könnte. Seine Masse soll nur das Doppelte der Erdmasse ausmachen und seine Helligkeit etwa der eines Sternes 13. Größe gleichkommen. Der Einfluß dieses ungefähr in der Ebene der Ekliptik angenommenen Planeten auf die Bewegung Neptuns ist noch kaum nachweisbar; dagegen scheint ein anderer Planet die Neptunbahn zu stören, da sich nach den Untersuchungen W. H. Pickerings die Breiten Neptuns nicht mit befriedigender Genauigkeit darstellen lassen. Die Abweichungen erreichen zwar kaum 2″, entsprechen aber, was ihre Verteilung anlangt, nicht dem Gesetze des Zufalls. Sie deuten vielmehr auf Störungswirkungen hin, die von einem der Sonne im Vergleich zu Neptun nahen Körper ausgehen, dessen Ort an der Sphäre gegenwärtig nicht sehr weit vom nördlichen Pole der Ekliptik abliegen dürfte.

Meteore.

VI. Meteore und Zodiakallicht. Die Meteore, die wir je nach ihrem Glanze Sternschnuppen oder Feuerkugeln (Bolide) nennen, haben zwar schon von alters her die Aufmerksamkeit auf sich gezogen und die Phantasie der Menschen lebhaft beschäftigt, doch ist es erst der Forschung des 19. Jahrhunderts gelungen, über die Provenienz und Bewegung dieser leuchtenden Gebilde einen im allgemeinen befriedigenden Aufschluß zu geben. In früheren Zeiten war die Meinung vorherrschend, daß die Meteore Produkte der Erdatmosphäre seien. Man hielt sie auch wohl für Bestandteile des Auswurfes der Vulkane des Mondes oder der Erde. Es fehlte zwar nicht an Männern der Wissenschaft, die für den kosmischen Ursprung der Meteore eintraten, wohl aber an Beobachtungen, die eine sichere Prüfung der verschiedenen Theorien zuließen. Gelegentliche Beobachtungen von Feuerkugeln, die ungefähr gleichzeitig in weit voneinander entfernten Ortschaften gesehen wurden, deuteten darauf hin, daß die Flugbahnen mehr als 60 Kilometer über der Erdoberfläche lagen. Daß auch Sternschnuppen in so großen Höhen aufleuchten, hielt man aber nicht für wahrscheinlich. Brandes und Benzenberg, die im Jahre 1798 systematische Höhenbestimmungen auszuführen begannen, mußten die anfangs gewählte Standlinie bedeutend vergrößern, um in dem Dreiecke, das durch die geradlinige Verbindung des

Höhe der Meteore.

Ortes des Aufleuchtens bzw. Verlöschens der Sternschnuppe und der beiden Beobachtungsstationen gebildet wird, die Höhe aus der Grundlinie und den anliegenden Winkeln mit einiger Sicherheit berechnen zu können. Die gefundenen Höhen lagen vorwiegend zwischen den Grenzen 150 und 70 Kilometer. Bei Einbeziehung neuerer Bestimmungen ergibt sich für die mittlere Höhe des Aufleuchtens ungefähr 120, für die des Verlöschens etwa 85 Kilometer. Die scheinbare Bewegung der Sternschnuppen vollzieht sich fast immer in einem Bogen größten Kreises an der Sphäre. Körper, die nicht kugelförmig sind, können durch den Widerstand der Luft von der ursprünglichen Bewegungsrichtung sehr stark abgelenkt werden. Es sind auch, allerdings selten, Sternschnuppen beobachtet worden, deren scheinbare Bahnen scharfe Krümmungen aufwiesen. Scheinbare Bewegung.

Der Widerstand der Luft ist auch die direkte Ursache für das Aufleuchten der an sich dunklen Meteore. Dringt ein solcher Körper mit einer Geschwindigkeit, die bis zu 70 Kilometer in der Sekunde betragen kann, in die Erdatmosphäre ein, so wird seine Geschwindigkeit durch den Luftwiderstand stark vermindert, wobei ein entsprechender Teil der lebendigen Kraft in Wärme umgesetzt wird, die den Körper und vielleicht auch die ihn umgebende Gasschicht zum Leuchten bringt.

Die Helligkeit der Sternschnuppen ist während der kurzen Dauer ihrer Sichtbarkeit nahezu konstant. Eine untere Grenze dürfte es hierfür kaum geben, da mitunter Sternschnuppen beobachtet worden sind, die im Gesichtsfelde großer Fernrohre gerade noch wahrnehmbar waren. Die obere Grenze ist ungefähr die Helligkeit der Venus, da Meteore, die noch heller sind und schon deutliche Schatten werfen, Feuerkugeln genannt werden. Helle Sternschnuppen und Feuerkugeln hinterlassen gewöhnlich leuchtende Spuren, die längere Zeit (bis zu einigen Minuten) sichtbar bleiben und zuweilen eine Änderung der Form erkennen lassen. Meteore, welche uns als Sternschnuppen erscheinen, werden schon in den oberen Luftschichten vollständig verdampft. Größere Meteore haben einen längeren Bestand und können, wenn ihre Masse sehr beträchtlich ist, unter günstigen Umständen die Atmosphäre nach außen hin wieder verlassen oder auf die Erde fallen. Gewöhnlich geht dem Sturz auf die Erde ein von einer starken Detonation gefolgtes Platzen des Meteors voraus, dessen Ursache in Spannungen zu suchen ist, die durch das zu langsame Abströmen der Wärme von außen nach innen oder durch die Erhitzung eingeschlossener Gasmengen entstehen. Auf die Erde gestürzte Meteore heißen Meteorsteine oder Aerolithe. Sie werden nach dem Vorherrschen von Eisen oder nichtmetallischen Bestandteilen in Eisenmeteorite (Siderite), die reich an Nickeleisen sind, und Steinmeteorite (Kieselsäure, Tonerde, Kalk, Magnesia) eingeteilt. Eine Zwischenstufe bilden die Mesosiderite, welche Eisen und Stein zu fast gleichen Teilen enthalten. In den meisten Steinmeteoriten kommt auch etwas Eisen vor. In allen bisher untersuchten Meteoriten hat sich noch kein chemisches Element nachweisen lassen, das nicht auch auf der Erde vorkäme. Das Gewicht der aufgefun- Helligkeit. Zusammensetzung.

denen Aerolithe variiert zwischen wenigen Grammen und Tausenden von Kilogrammen. Die Gewichtsbestimmung der Sternschnuppen ist sehr unsicher, da sie sich nur auf die Dauer und Intensität der Lichtentwicklung gründen kann. Es scheint, daß das Gewicht selten mehr als einige Gramm beträgt.

Sternschnuppenschwärme. Radiationspunkt.

Die Häufigkeit der Sternschnuppen ist eine sehr veränderliche Größe. Während ein Beobachter durchschnittlich nur 4—6 Sternschnuppen in der Stunde sehen kann, läßt sich in manchen Nächten in derselben Zeit mehr als die zehnfache Anzahl wahrnehmen. Schon einige Male hat sich das Sternschnuppenphänomen in einer Pracht gezeigt, die, wie Augenzeugen berichten, jeder Beschreibung spottet, indem die ganze Himmelsdecke zeitweilig von einem Feuerregen (Leonidenstrom) überflutet schien. Bei einer solchen Gelegenheit (1833) ist die wichtige Entdeckung gemacht worden, daß die scheinbaren Bahnen aller beobachteten Sternschnuppen nicht regellos über den Himmel verteilt, sondern so gelegen waren, daß sie nach rückwärts verlängert sich ungefähr in demselben Punkte der rotierenden Sphäre schneiden. Seither wurde für viele andere Sternschnuppenfälle das Vorhandensein gemeinsamer Schnittpunkte der Bahnen konstatiert. Da diese Punkte gewissermaßen die Ausstrahlungszentren für die zugehörigen Sternschnuppen darstellen, werden sie Radiationspunkte oder Radianten genannt. Jeder Radiant ist unendlich weit entfernt zu denken; seine Rektaszension und Deklination sind von der Lage des Beobachters auf der Erde vollständig unabhängig. Die zu einem Radianten gehörigen Sternschnuppen bewegen sich in parallelen Bahnen, deren in unserer Atmosphäre gelegene Teile sehr nahe geradlinig sind, da nur bei dieser Anordnung ein gemeinsamer, unendlich weit entfernter Schnittpunkt auftritt. Die durch den Luftwiderstand erzeugte, im allgemeinen geringe Ablenkung der Bahnen von der ursprünglichen Bewegungsrichtung offenbart sich in einer geringen Verschiebung Schnittpunkte, die jedoch fast alle innerhalb einer eng umschriebenen Fläche liegen. Als Radiationspunkt hat dann der Schwerpunkt dieser Fläche zu gelten. Eine im Radiationspunkt aufleuchtende Sternschnuppe bleibt stationär; je weiter vom Radiationspunkt weg das Aufleuchten erfolgt, desto länger ist gewöhnlich die scheinbare Bahn der Sternschnuppe. Der Komplex der in parallelen Bahnen sich bewegenden Meteoriten (Sternschnuppen) heißt ein Meteoriten(Sternschnuppen)-Schwarm. Der Radiant ist für die Bewegung des Schwarmes von besonderer Wichtigkeit, weil die vom Radianten gegen das Erdzentrum gezogene Linie die Richtung markiert, in welcher der Schwarm gegen die Erde vordringt. Ist außer der Richtung noch die Größe der Geschwindigkeit bekannt, so kann man die heliozentrische Bahn des Schwarmes bestimmen.

Sporadische Sternschnuppen.

Außer den gruppenweisen, mit einiger Sicherheit als Individuen eines Schwarmes anzusehenden Sternschnuppen gibt es eine Unzahl von sporadischen Sternschnuppen, die keine Zusammengehörigkeit zu besitzen scheinen und sich so bewegen, als ob ihre Radianten ziemlich gleichmäßig über die

ganze Sphäre verteilt wären. Die Häufigkeit ihres Erscheinens ist nicht konstant, sondern zeigt eine deutlich markierte tägliche und ebenso auch eine jährliche Variation. Die Zahl der in einer Stunde einem Beobachter sich darbietenden Sternschnuppen wächst vom Abend bis gegen 3 Uhr morgens auf das Zwei- bis Dreifache und nimmt dann langsam wieder ab. Dividiert man die Zahl der in jeder Nacht gesehenen Sternschnuppen durch die entsprechende Stundenzahl und bildet so die mittlere stündliche Häufigkeit, so findet man, daß diese Größe im Frühling ein Minimum (3.6), zu Beginn des Herbstes ein Maximum (7.0) wird und in den Solstitien ungefähr denselben Wert (5.0) annimmt. Unter allen Sternschnuppen kommen mehr als die Hälfte vom Osten her, während die von Norden, Westen, Süden kommenden der Zahl nach nicht sehr verschieden sind. Die Ursache dieser Ungleichmäßigkeit in der Häufigkeit und in der Bewegungsrichtung der Sternschnuppen ist, wie Schiaparelli nachgewiesen hat, die Bewegung der Erde um die Sonne. Bei gleichförmiger Verteilung und gleicher Energie der Radianten müßte, wenn sich die Erde in Ruhe befände, die Häufigkeit der Sternschnuppen konstant sein. Die jeweilige Bewegung der Erde erfolgt nach dem Punkte der Ekliptik, in welchem sich die Sonne drei Monate früher befunden hat. Dieser Punkt wird der Apex der Erdbewegung genannt.

Tägliche und jährliche Variation der Häufigkeit.

Durch die Bewegung der Erde erfährt jeder Radiationspunkt eine scheinbare Verschiebung in der Richtung gegen den Apex. Bedeuten G, V die linearen Geschwindigkeiten der Bewegung der Erde und des Schwarmes, ψ' den im größten Kreise gemessenen Abstand des Apex von dem durch den Schnittpunkt der scheinbaren Bahnen bestimmten, sogenannten scheinbaren Radiationspunkte, so erhält man nach den Prinzipien der relativen Bewegung den Abstand ψ des (in demselben größten Kreise gelegenen) wahren Radiationspunktes vom Apex durch die Formel

$$\sin(\psi - \psi') = \frac{G}{V} \sin \psi'.$$

An einem Orte, wo der Apex gerade im Zenit steht (was nur in den Tropen möglich ist), kann ein Beobachter alle scheinbaren Radianten sehen, deren Zenitdistanzen zwischen 0° und 90° liegen. Die vom Zenit am weitesten entfernten Radianten, welche noch bis zum Horizonte gehoben werden, sind nach obiger Formel jene, für welche ψ die Bedingung erfüllt $\sin(\psi - 90^\circ) = \frac{G}{V}$. Setzt man für $\frac{G}{V}$ den nahe richtigen Wert $\frac{1}{\sqrt{2}}$, so ergibt sich $\psi = 135^\circ$. Bei gleichmäßiger Verteilung der wahren Radianten verhält sich daher die Zahl der sichtbaren Radianten zur Zahl aller Radianten wie die Fläche einer Kugelkalotte vom sphärischen Radius 135° zur Fläche der ganzen Kugel, d. i. wie $1 + \frac{1}{\sqrt{2}}$ zu 2. Der Beobachter überblickt daher ungefähr $\frac{5}{6}$ aller Radianten, sein Antipode nur $\frac{1}{6}$. Liegt der Apex im Horizonte, so ist die Hälfte aller Radianten sichtbar. Unter Voraussetzung gleicher Energie der Ra-

dianten ist die Zahl der erscheinenden Sternschnuppen der Zahl der sichtbaren Radianten proportional. Die Häufigkeit der Sternschnuppen wäre dann nur von der Höhe des Apex abhängig. Die gemachten Voraussetzungen sind zwar nicht streng richtig, aber, wenn man von den dichteren Sternschnuppenschwärmen absieht, im großen und ganzen doch nahe zutreffend. Die tägliche Variation der Häufigkeit ist darin begründet, daß der Apex ungefähr um 6^h abends seinen tiefsten und 12^h später seinen höchsten Stand erreicht. Die den Beobachtungen zufolge in den letzten Morgenstunden eintretende, geringe Abnahme der Häufigkeit wird wohl hauptsächlich der beginnenden Dämmerung zuzuschreiben sein. In ähnlicher Weise findet die jährliche Variation ihre Erklärung, da vom Frühling zum Herbste die Deklination des Apex von $-23°$ bis $+23°$ zunimmt, und daher für nördliche Breiten der Apex immer weniger tief unter den Horizont sinkt und in den Morgenstunden sich immer höher über denselben erhebt. In den Solstitien ist die Deklination des Apex dieselbe ($0°$), die mittlere stündliche Häufigkeit daher gleich. Da der Apex auf seinem Wege von der unteren zur oberen Kulmination und daher während der ganzen oder wenigstens des weitaus größten Teiles jeder Nacht sich auf der Ostseite des Meridians befindet, kommen auch die meisten Sternschnuppen von Osten her.

Amplitude der Variation.

Die berechneten Amplituden beider Variationen hängen wesentlich vom angenommenen Werte der Größe $\frac{G}{V}$ ab. Schiaparelli hat gefunden, daß die beobachteten Amplituden der täglichen Variation am besten dargestellt werden, wenn für V ungefähr die Geschwindigkeit (42 Kilometer) gesetzt wird, welche ein sich in einer Parabel bewegender Körper in der Einheit der Entfernung (Erdbahnhalbmesser) von der Sonne besitzt. Die hieraus sich ergebende Gleichheit der typischen Bahnform von Sternschnuppen und Kometen brachte Schiaparelli auf den Gedanken, daß die Sternschnuppen denselben Ursprung haben wie die Kometen und vielleicht aus diesen entstanden seien. Um die Berechtigung dieser Anschauung einer Prüfung unterziehen zu können, berechnete er die parabolischen Elemente gut beobachteter Sternschnuppenschwärme aus deren scheinbaren Radianten. Die Kenntnis von V genügt nämlich zur Bestimmung der Lage des wahren Radianten, worauf Größe und Richtung der heliozentrischen Geschwindigkeit des Schwarmes gegeben sind, die zusammen mit dem der Beobachtungszeit entsprechenden Erdorte, der zugleich als Ort der Sternschnuppen aufgefaßt werden kann, ausreichende Grundlagen für die Bahnbestimmung bilden. Eine Bestätigung des vermuteten Zusammenhanges zwischen Sternschnuppen und Kometen ließ nicht lange auf sich warten, da sich binnen wenigen Jahren herausstellte, daß die Bahnelemente mehrerer periodischer Kometen eine frappante Ähnlichkeit mit den Elementen von Sternschnuppen aufweisen. Der dem Bielaschen Kometen entsprechende Schwarm von Meteoriten hat in den Jahren 1872 und 1885 zu prächtigen Sternschnuppenfällen Veranlassung gegeben.

Zusammenhang von Sternschnuppen und Kometen.

Die Zuordnung ist folgende:

Scheinbarer Radiant	Sternschnuppen	Fallzeit	Komet	Periode des Kometen
Leier	Lyriden	23—27. April	1861 I	415 Jahre
Perseus	Perseiden	9—14. August	1862 III	120 „
Löwe	Leoniden	13—15. November	1866 I	$33\frac{1}{5}$ „
Andromeda	Bieliden	23. November	Biela	$6\frac{3}{4}$ „

Ringförmige Anordnung der Meteoriten.

Die zu diesen Strömen gehörigen Meteoriten bilden je einen die Sonne umgebenden elliptischen Ring, der von der Ekliptik so geschnitten wird, daß die Erde in ihrer Bewegung um die Sonne nur eine der Schnittstellen passiert. Die Dauer der Tätigkeit des Radianten bestimmt die Breite des Meteoritenringes. Die Lyriden und Perseiden sind ziemlich gleichmäßig über die ganze Bahn verteilt, da sie jedes Jahr in ungefähr gleichbleibender Anzahl erscheinen. Dagegen ist bei den Strömen der Leoniden und Bieliden die überwiegende Mehrheit der Meteoriten in einem relativ kleinen Teile des Ringes enthalten. Die erwähnten, außerordentlich reichen Fälle der Leoniden und Bieliden sind auf den Durchgang der Erde durch diese Anhäufungen von Materie zurückzuführen. Die Leoniden haben sich schon oft in sehr großer Menge gezeigt. Prof. A. Newton konnte das Leonidenphänomen bis in das Jahr 902 zurückverfolgen und durch eingehende Untersuchungen feststellen, daß die Hauptmasse der Meteoriten zu einer Wolke verdichtet ist, die etwa den 15. Teil des Ringes einnimmt und von der Erde im Mittel alle $33\frac{1}{4}$ Jahre durchquert wird. Die Umlaufszeit des Schwarmes ist daher fast identisch mit der des Kometen 1866 I. Die Begegnung mit der Erde verspätet sich (infolge einer Drehung der Ringebene) durchschnittlich um $1\frac{1}{2}$ Tage im Jahrhundert. Newtons Vorhersagung (1864) eines großartigen Sternschnuppenfalles für das Jahr 1866 ging in der Nacht vom 13. auf den 14. November in Erfüllung; von 12^h bis 2^h sind in Greenwich 6900 Meteore beobachtet worden. Die nächste Begegnung der Wolke mit der Erde hätte im Jahre 1899 stattfinden sollen; sie ist jedoch unterblieben, da, wie die Rechnung zeigte, die Störungen durch die Planeten eine beträchtliche Änderung des Radiusvektors der Wolke bewirkt haben.

Daß die hier angeführten Schwärme einen mit den betreffenden Kometen gemeinsamen Ursprung haben, ist kaum zu bezweifeln. Es ist jedoch schwer zu entscheiden, ob sie durch partiellen Zerfall der Kometen entstanden sind oder als Bestandteile derselben Staubwolke eine den Kometen koordinierte Stellung einnehmen. Es gibt gewiß viele Schwärme, die aus Wolken kosmischen Staubes hervorgegangen sind, denen die zur Bildung von Kometen nötige Verdichtung fehlt. Die Dehnung von Wolken zu ringförmigen Gebilden ist eine Folge der Anziehung von Sonne und Planeten. Eine kosmische Wolke, die sich in einer parabolischen oder hyperbolischen Bahn um die Sonne bewegt, wird wohl in der Nähe des Perihels eine Verlängerung in der Bewegungsrichtung erfahren, aber in gleichen Entfernun-

gen von der Sonne (vor und nach dem Periheldurchgange) dieselbe Ausdehnung besitzen. Wird jedoch durch die Wirkung der Planeten die Bahn elliptisch, so muß, da die Umlaufszeit der Teilchen, die bei der Perihelpassage der Sonne näher liegen, kleiner ist als die der weiter entfernten Teilchen, eine Zerstreuung derselben eintreten, welche im Laufe der Zeit zur Umbildung der Wolke in einen Ring führt. Hierbei können besonders dichte und daher mehr zusammenhängende Teile der Wolke der Auflösung lange widerstehen. Der Grad der Zerstreuung über die ganze Bahn gibt einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der Zeit, während welcher der Schwarm in der Attraktionssphäre der Sonne verweilt hat. Das Alter der Perseiden ist hiernach höher anzunehmen als das der Leoniden.

Zodiakallicht.

In einer gewissen Verwandtschaft zu den Meteorschwärmen mag auch das Zodiakallicht stehen. Es ist dies ein über den Tierkreis verteilter zarter Lichtschimmer, dessen Helligkeit mit der Entfernung von dem durch das Sonnenzentrum eingenommenen Punkte der Ekliptik langsam abnimmt, in Entfernungen über 170° jedoch, d. i. nahe dem Gegenpunkte der Sonne, wieder merklich anwächst und hierdurch zum Auftreten des unter dem Namen Gegenschein bekannten Phänomens Veranlassung gibt. Die Sichtbarkeit des Zodiakallichtes und Gegenscheines wird durch die allgemeine Absorption des Lichtes in unserer Atmosphäre sehr stark beeinflußt. Da um so weniger Licht absorbiert wird, je durchsichtiger die Luft ist, und je näher die Stelle, von der das Licht ausgeht, dem Zenit liegt, so ist die volle Entfaltung des Zodiakallichtes nur bei großer Durchsichtigkeit der Luft und bei großer Neigung der Ekliptik zum Horizonte zu erwarten. In den Tropen sind bei schönem Wetter diese Bedingungen gewöhnlich erfüllt. Deshalb zeigt sich auch dort das Zodiakallicht sehr oft in seiner ganzen Pracht und läßt sich in der Regel leicht über den ganzen Himmel verfolgen. Einen besonders schönen Anblick gewährt der hellste Teil, ein Lichtkegel, der bei anbrechender Nacht im Westen, vor Eintritt der Morgendämmerung aber im Osten auf dem Horizonte zu ruhen scheint und an Glanz die Milchstraße nicht unwesentlich übertrifft.

In höheren geographischen Breiten, wie z. B. in Deutschland, ist die Luft nicht so durchsichtig und die Stellung der Ekliptik zum Horizonte lange nicht so günstig wie in den Tropen. Dementsprechend ist das Zodiakallicht nur selten eine augenfällige Erscheinung. Es ist im allgemeinen am besten zu sehen, wenn der Winkel zwischen Ekliptik und Horizont möglichst groß ist und die Sonne nicht zu tief unter dem Horizonte steht, was im Frühling nach der Abenddämmerung und im Herbste vor der Morgendämmerung zutrifft. Der Lichtkegel kann jedoch nur selten über den Meridian hinaus verfolgt werden. Immerhin gelingt es bisweilen, die Verbindung des Lichtkegels mit dem Gegenschein wahrzunehmen.

Gegenschein.

Der Gegenschein ist im Jahre 1854 von Brorsen auf der Sternwarte in Senftenberg (Böhmen) entdeckt worden; er ist zur Zeit der Frühlingsnachtgleiche am deutlichsten zu sehen und scheint von einer ovalen, unscharf be-

grenzten Fläche des Himmels auszugehen, deren größter Durchmesser in der Ekliptik liegt und nach Schätzungen Nijlands etwa 12° beträgt, während auf den kleinsten Durchmesser nur ungefähr 9° entfallen. Die Mitte der Fläche ist von der Sonne ziemlich genau um 180° entfernt, befindet sich jedoch gewöhnlich 1° bis 2° nördlich von der Ekliptik.

Spektrum des Zodiakallichtes.

Das Spektrum des Zodiakallichtes hat große Ähnlichkeit mit dem Sonnenspektrum. In den auf der Licksternwarte erhaltenen Spektrogrammen lassen sich mehrere Fraunhofersche Linien (G, H, K) mit Sicherheit nachweisen. Das Auftreten dieser Linien beweist, daß der größte Teil des Lichtes reflektiertes Sonnenlicht ist.

Das Zodiakallicht mußte hier erwähnt werden, weil neuerdings gewisse Störungen in der Bewegung der Planeten durch dasselbe zu erklären versucht wurden. Die plausibelste Deutung des Zodiakallichtes beruht auf der Annahme einer äußerst fein zerstreuten, um die Sonne gelagerten und über die Erdbahn hinausreichenden Materie, die über einen Raum von linsenförmiger Begrenzung ungefähr symmetrisch zur Ebene der Ekliptik verteilt ist. Das von den Teilchen dieser Materie gegen die Erde zurückgeworfene Sonnenlicht bedingt die Erscheinung des Zodiakallichtes. Nimmt man ferner an, daß die Teilchen eine rauhe Oberfläche besitzen, so läßt sich auch das Phänomen des Gegenscheines theoretisch begründen. Die gesamte Masse der Teilchen kann nicht ohne Einfluß auf die Bewegung der Planeten bleiben. Nach den Untersuchungen v. Seeligers läßt sich unter der Annahme, daß die Masse der in der Volumeneinheit enthaltenen Teilchen mit der Entfernung von der Sonne abnimmt, ein Wert für die gesamte Masse angeben, der nicht nur die Beschleunigung der Bewegung des Merkurperihels vollständig erklärt, sondern auch geringe, der Theorie der Bewegung von Merkur, Venus, Erde, Mars anhaftende Unvollkommenheiten zu verbessern scheint. Dieser Wert ist $\frac{1}{10}$ der Erdmasse. Auf die Bewegung der anderen großen Planeten hat die Materie des Zodiakallichtes keinen merklichen Einfluß.

Masse der staubförmigen Materie.

Literatur.

S. 216. Eine ausführliche Darstellung der alten Planetentheorien gibt N. HERZ, Allg. Einleitung in die Astronomie, in Valentiners Handwörterb. der Astronomie.

S. 233. Die neuesten Werke über Mechanik des Himmels sind: F. TISSERAND, Traité de Mécanique Céleste I—IV (Paris, 1889—96); C. V. J. CHARLIER, Die Mechanik des Himmels I—II (Leipzig, 1902—07); H. POINCARÉ, Leçons de Mécanique Céleste (Paris, 1905—10). Einen Überblick über die Entwicklung der Theorie der Figur der Himmelskörper gibt S. OPPENHEIM, Die Gleichgewichtsfiguren rotierender Flüssigkeitsmassen und die Gestalt der Himmelskörper I—II (Prag, 1906—07). Die Präzession behandelt ausführlich L. DE BALL, Lehrbuch der sphärischen Astronomie (Leipzig, 1912).

S. 235. Der Titel der Arbeit J. N. STOCKWELLS lautet: Memoir on the Secular Variation of the Elements of the Orbits of the eight principal Planets (Washington, 1872).

S. 238. Einen Beitrag zur Forschung nach den Ursachen der Lücken gibt A. PREY, Über die Lage der Lücken im Systeme der kleinen Planeten in ihrer Beziehung zu den übrigen Distanzen im Sonnensystem (Astron. Nachr. Bd. 189, 1911).

S. 239. Über Helligkeit, Form und Natur der Kometen siehe: J. HOLETSCHEK, Untersuchungen über die Größe und Helligkeit der Kometen und ihrer Schweife (Wien. Denkschr. Bd. 63, 77, 88); J. v. HEPPERGER, Über die physische Beschaffenheit der Kometen (Astron. Kalender, Wien, 1887).

S. 240. Die Stellung der Kometen bezüglich unseres Sonnensystems wird erörtert in den Abhandlungen: G. SCHIAPARELLI, Orbites cométaires, courants cosmiques, météores (Bulletin astronomique 27, 1910); C. HILLEBRAND, Über die wahrscheinliche Bahnform und den Ursprung der Kometen (Wien. Denkschr. 81); G. FAYET, Recherches concernant les excentricités des Comètes (Paris, 1906).

S. 241. M. ROLLER hat in dem Aufsatze: Reihung der elliptisch berechneten Kometen nach Apheldistanzen (Astron. Nachr. Bd. 75, 1864) zuerst auf die zwischen gewissen Kometen und großen Planeten bestehenden Beziehungen hingewiesen. Denselben Gegenstand behandeln: H. C. WILSON, The Comet Families of Saturn, Uranus and Neptun (Popular Astronomy 17, 1909); W. H. PICKERING, A statistical investigation of cometary Orbits (Harvard Annals 61, 1909).

S. 245. Eine Auseinandersetzung der besprochenen sowie auch neuerer Methoden geben J. BAUSCHINGER, Die Bahnbestimmung der Himmelskörper (Leipzig, 1906); J. KLINKERFUES, Theoretische Astronomie III. Ausgabe, Neubearbeitung von H. BUCHHOLZ (Braunschweig, 1912). Die neueren grundlegenden Untersuchungen über die Planetenbahnen und Störungen verdanken wir namentlich S. NEWCOMB.

S. 250. Der Bericht über die Auffindung Neptuns ist dem von W. FOERSTER geschriebenen Nekrologe entnommen (Vierteljahrsschrift der Astr. Gesellsch. 46, 1911).

S. 252. Die oben erwähnte Arbeit PICKERINGS (Harvard Annals 61) enthält auch Anhaltspunkte für die Annahme der Existenz unbekannter Planeten.

S. 252f. Das grundlegende Werk für die Meteorastronomie bildet G. SCHIAPARELLIS Entwurf einer astronomischen Theorie der Sternschnuppen, Autorisierte deutsche Ausgabe der Note e Riflessioni sulla Teoria astronomica delle stelle cadenti von G. BOGUSLAWSKI (Stettin, 1871). Ergänzungen hierzu bilden: E. WEISS, Beiträge zur Kenntnis der Sternschnuppen I—II (Wien Akad. Sitzungsb. 57 und 62); E. WEISS, Höhenbestimmung der Sternschnuppen (Wien Denkschr. 1905); G. v. NIESSL, Theoretische Untersuchungen über die Verschiebung der Radiationspunkte aufgelöster Meteorschwärme (Wien Akad. Sitzungsb. 1881).

S. 258. J. MÖLLER, Beobachtung des Zodiakallichtes in verschiedenen Breiten (Astron. Nachr. Bd. 170, 1905). Über die Masse der Materie des Zodiakallichtes siehe H. SEELIGER, Das Zodiakallicht und die empirischen Glieder in der Bewegung der inneren Planeten (Kgl. Bayer. Akad. 1906).

PHYSISCHE ERFORSCHUNG DES PLANETENSYSTEMS.

Von

K. Graff.

I. Erste Anwendung des Fernrohrs auf die Himmelsbeobachtung. Auf keinem anderen Wissensgebiete konnte die um das Jahr 1608 geglückte Erfindung des Fernrohrs so bedeutende Umwälzungen hervorrufen wie in der astronomischen Forschung. Die gewaltige, bis dahin unüberwindliche Kluft zwischen der Erde und den Gestirnen war zwar mit der denkwürdigen holländischen Erfindung nicht beseitigt, aber doch so weit überbrückt, daß schon die ersten Himmelsbeobachtungen zu den weitestgehenden Hoffnungen berechtigten. Das kleine Fernrohr Galileis, das sich dieser lediglich auf Grund einer Beschreibung des neuen, so einfachen Instruments konstruiert, übertrifft bei seiner ersten Anwendung auf den nächtlichen Himmel alle Erwartungen. Die lichte Wolke der Plejaden löst sich in einen dichten Sternhaufen von mehr als 40 Objekten auf, und in gleicher Weise offenbaren auch der Präsepenebel im Krebs und die Milchstraße ihre wahre Sternnatur. Der Mond zeigt Berge und Täler, Jupiter ist von 4 Monden umgeben, die in regelmäßigen Zwischenzeiten den Hauptkörper umkreisen, der strahlende Morgenstern und der merkwürdige rote Mars zeigen Phasen, die ähnlich wie beim Monde mit ihrer räumlichen Stellung zur Sonne zusammenhängen und deutlich die Kugelgestalt dieser Wandelsterne verraten. Am äußersten bekannten Planeten, Saturn, erkennt man eine zunächst unerklärliche, veränderliche Henkelgestalt, und selbst die Sonne, bis dahin das Idealbild ungetrübter Reinheit, zeigt größere und kleinere Flecken, die sie mit herumschwingt bei ihrer ständigen Umdrehung um eine fest im Raume gelegene Rotationsachse.

Eine erdrückende Fülle von neuen Tatsachen der Himmelskunde fordert eine genaue Untersuchung und Einfügung in den Schatz bisher erlangter Erkenntnis. Urplötzlich, mit einem Schlage, war eine Reihe neuer naturwissenschaftlicher Wunder dem menschlichen Auge enthüllt. Zu der Astronomie des Altertums und des Mittelalters, die, von einzelnen Spekulationen abgesehen, sich fast nur mit der Bewegung der Gestirne befaßte und befassen konnte, trat jetzt ein vollständig neuer Zweig hinzu — die Erforschung der physischen Eigentümlichkeiten der Himmelskörper, in erster Linie von Sonne, Mond und Planeten, da schon die ersten Versuche Galileis keinen

Zweifel darüber ließen, daß im Bereiche der unendlichen Fixsternwelt das neue Instrument wohl dicht nebeneinanderstehende Objekte trennen und schwächere Sterne dem Auge sichtbar machen, dagegen direkt kaum irgend etwas von ihren physischen Eigentümlichkeiten entschleiern würde.

Die Lehre des Kopernikus, die nach Ablauf von dreiviertel Jahrhunderten erst im Kreise einer kleinen Zahl von Fachmännern sich Geltung und Anerkennung verschafft hatte, die Lehre, die in dem Satze, die Erde ein Planet, jeder Planet eine Erde, gipfelte, konnte jetzt, nach Beseitigung der letzten Zweifel kaum noch einem überzeugten Widerspruch begegnen. Mit dem gesteigerten Interesse erweitert sich dabei ganz von selbst das Forschungsgebiet und damit auch der Jüngerkreis der Himmelskunde, deren Pflege bis dahin in der Obhut einzelner hochbefähigter Gelehrter gelegen hatte. Die Erforschung der kosmischen Gesetze, insbesondere der Bewegung der Planeten, mußte ja auch fernerhin als Kernpunkt astronomischer Rechen- und Beobachtungstätigkeit bestehen bleiben; das nicht zu unterschätzende geistige Band zwischen dem Fachgelehrten und dem gebildeten Laien ist aber ohne Frage erst in dem Moment geknüpft worden, als das Fernrohr dem leiblichen Auge einiges von den Weltmysterien offenbarte, nach denen sich das geistige schon seit Jahrtausenden gesehnt hatte.

Langsames Fortschreiten der ersten Arbeiten am Fernrohr.

Wie bei allen großen Entdeckungen und Erfindungen der Geschichte mußte auch beim Fernrohr erst eine geraume Zeit vergehen, ehe man die Anwendungsmöglichkeit des Instruments in der Astronomie vollkommen erfaßt und auf Grund der praktischen Erfahrungen das zielbewußte Sehen durch das Instrument, also das, was wir heute als Beobachtung bezeichnen, gelernt hatte. Es ist daher ein müßiges Beginnen, nachträglich darüber nachzugrübeln, welche Fülle astronomisch äußerst wichtiger Arbeiten bereits mit den bescheidenen Instrumenten jener Zeit hätte ausgeführt werden können, besonders wenn man neben den Planeten auch den Fixsternen, ihrer Katalogisierung, Größenschätzung usw. die gebührende Aufmerksamkeit gewidmet hätte. Bei solchen Betrachtungen ist auch nicht zu vergessen, daß die ersten Fernrohre große Mängel aufwiesen und bei ihrer Benutzung an die Geduld der Beobachter so große Anforderungen stellten, daß neben begeisterten Verkündern ihrer Leistungen auch Stimmen laut wurden, die vor der Überschätzung der mit ihnen erzielten Ergebnisse warnten. Auch als Meßinstrument erfuhr das Fernrohr wegen gewisser ihm noch anhaftender Mängel zum Teil mit Recht zunächst eine direkte Ablehnung, um erst nach und nach im 18. und 19. Jahrhundert die Würdigung zu erhalten, die ihm in dieser Hinsicht zukommt. Alle diese Umstände haben bewirkt, daß die Ausbeute an neuen wissenschaftlichen Tatsachen, die uns das Fernrohr in den ersten Jahrzehnten nach seiner Erfindung vermittelt hat, nicht besonders groß ist und sich fast ausschließlich auf physische Untersuchungen im Sonnensystem beschränkt, also auf die Feststellung solcher Tatsachen, die lediglich eine bloße Betrachtung der betreffenden Himmelsobjekte in dem neuen Instrument ergeben konnte.

Jedenfalls ist die Geschichte der Planetenforschung in den ersten beiden Jahrhunderten nach Erfindung des Fernrohrs gleichzeitig auch eine Geschichte dieses Instruments, denn erst die Erfolge Herschels auf dem Gebiete der bis dahin stiefmütterlich behandelten Erscheinungen der Fixsternwelt lenken zu Beginn des 19. Jahrhunderts das Interesse der Beobachter auf andere Bahnen. Die allerletzten Jahre haben dann wieder der Planetenkunde neue Freunde und sehr wesentliche Erfolge gebracht.

Die Erforschung der gelegentlich im Sonnensystem weilenden Kometen hat eine kürzere Geschichte. Über das Wesen dieser bis in das 18. Jahrhundert hinein mit ehrfurchtsvoller Scheu betrachteten ephemeren Gestirne hat das Fernrohr als solches wenig Klarheit gebracht. Die positiven Kenntnisse, über die die Himmelskunde hier verfügt, verdankt sie fast ausschließlich der Spektralanalyse und der Photographie, also durchaus modernen Disziplinen.

Es wird im folgenden auseinanderzusetzen sein, wie sich das Bild von der physischen Beschaffenheit der dunklen, von der Sonne erleuchteten Weltkörper unserer nächsten Nachbarschaft im Weltall schließlich gestaltet hat. Daß an dem Zustandekommen dieses Bildes gerade die letzten Jahrzehnte astronomischer Forschung erheblich mitgewirkt haben, wird sich aus den Darlegungen der Beobachtungsergebnisse als ein hoffnungsvoller Ausblick für die Zukunft ganz von selbst ergeben.

Die unteren Planeten.

II. Die physische Erforschung der Planeten. Man bezeichnet die Planeten Merkur und Venus, die sich innerhalb der Erdbahn um die Sonne bewegen, als untere Planeten. Aus ihrer geringen Distanz von der Sonne folgt, daß sie sich nie über einen bestimmten Winkelabstand hinaus von der Sonne entfernen, niemals der Sonne gegenüber am Nachthimmel erscheinen können. Der Winkelabstand dieser Planeten von der Sonne oder ihr Längenunterschied gegen diese wird Elongation genannt, und sein Grenzwert, die „größte Elongation", ist offenbar gleich dem von der Erde aus gesehenen scheinbaren Radius der betreffenden Planetenbahn. Infolge der Exzentrizität dieser Bahnen unterliegt die größte Elongation, namentlich beim Merkur, nicht unmerklichen Schwankungen; im Mittel beträgt sie für Merkur 23^0, für Venus 46^0. Man kann daher die unteren Planeten nur in der Abend- bzw. in der Morgendämmerung beobachten, wenn man nicht vorzieht, sie auf Grund ihrer genau bekannten Stellung mit Hilfe eines Fernrohrs am Tage aufzusuchen, was wegen ihres großen Glanzes keine Schwierigkeit bereitet. Die volkstümliche Bezeichnung Abend- und Morgenstern paßt sich somit den Sichtbarkeitsbedingungen der beiden unteren Schwestergestirne der Erde gut an.

Eine andere Besonderheit ergibt sich noch aus der Bahnlage der unteren Planeten, nämlich die Möglichkeit eines Vorüberganges vor der Sonne oder eines sog. Planetendurchganges. Da die pendelnde Bewegung der unteren Planeten um das Tagesgestirn nichts anderes ist als das Ergebnis einer über-

aus schrägen Projektion ihrer Bahn auf die Himmelskugel, so ist es klar, daß diese Planeten vom irdischen Standpunkte aus bald jenseits (obere Konjunktion) bald diesseits der Sonne (untere Konjunktion) stehen müssen. In der oberen Konjunktion sind sie um ihren vollen Bahnradius mehr, in der unteren um ebensoviel weniger von der Erde entfernt. Befindet sich der Planet zur Zeit der unteren Konjunktion hinreichend nahe an der Ebene der Erdbahn, d. h. in der Nähe seiner Knotenlinie, so kann die Verbindungslinie von der Erde zum Planeten in ihrer Verlängerung die Sonnenscheibe treffen, und man sieht ihn dann als schwarzes Scheibchen die Sonne von Osten nach Westen durchqueren: man beobachtet einen Merkur- bzw. Venusdurchgang.

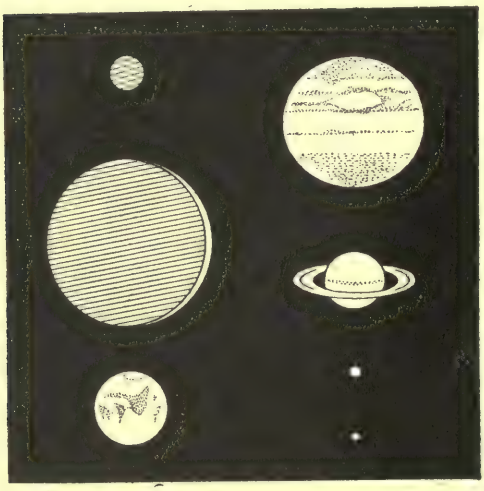


Fig. 16. Scheinbare Größe der Planeten von der Erde aus gesehen bei günstigsten Entfernungsverhältnissen.

Eine einfache Überlegung zeigt, daß die Nähe der unteren Konjunktionen für die Beobachtung dieser Weltkörper wegen der geringen Erdentfernung am günstigsten wäre, wenn nicht die unteren Planeten gerade um diese Zeit uns ihre dunkle Hemisphäre zukehrten. Merkur und Venus erscheinen also im günstigsten Falle, bei größtem scheinbaren Durchmesser als schmale Sicheln, deren Beobachtung auch bei größter Aufmerksamkeit und Sorgfalt nur wenig Erfolg verspricht (Fig. 16). Man braucht sich nur einen so reich gegliederten Weltkörper wie unseren Mond unmittelbar vor und nach Neumond mit bloßem Auge oder in einem schwach vergrößernden Fernglase anzusehen, um zu erkennen, wie wenig versprechend der Versuch sein muß, aus dem erleuchteten mit Projektionsfehlern behafteten schmalen Randstreifen eines kugelförmigen Weltkörpers Schlüsse über die ganze Oberflächenbeschaffenheit zu gewinnen. Die Schwierigkeiten werden nahezu unüberwindlich, wenn die betreffenden Planeten, wie es bei Merkur und bei Venus der Fall zu sein scheint, eine kaum merkliche Oberflächengliederung in hellere und dunklere Gebiete aufweisen, und wenn ihre kosmische Lage in ständiger Nähe der Sonne eine dauernde Überwachung ausschließt. Alle diese Schwierigkeiten müssen berücksichtigt werden, wenn man die auch heute noch recht geringen Kenntnisse über die physische Beschaffenheit der beiden unteren Planeten richtig beurteilen will.

Merkur. Schon für die Betrachtung mit bloßem Auge galt von jeher der Planet Merkur als ein ganz besonders schwieriges Objekt, und noch heutzutage ist er den größeren Kreisen gelegentlicher Himmelsbeobachter unserer Gegen-

den fast unbekannt, obwohl er zu gewissen Zeiten den Glanz des hellsten Fixsterns, des Sirius, erreicht und dann auch ohne Schwierigkeit unmittelbar nach Sonnenuntergang oder kurz vor Sonnenaufgang gesehen werden kann. Rechnet man allerdings die Stunden zusammen, während deren Merkur ein deutliches, leicht erkennbares Objekt am gestirnten Himmel darstellt, so würde kaum mehr als ein Dutzend im Jahre herauskommen. Ist doch die größte Zwischenzeit, die zwischen dem Durchgang der Sonne und des Planeten durch die Horizontlinie verfließt, durch knappe $1^1/_2$ Stunden bemessen, wobei noch die Trübungen, die unsere Atmosphäre in der Nähe des Horizontes fast das ganze Jahr hindurch aufweist, störend einwirken.

In Anbetracht dieser Schwierigkeiten kann es kaum verwundern, daß die ersten Fernrohrbeobachter angesichts der viel interessanteren Aufgaben, die ihnen das Reich der übrigen Planeten darbot, Merkur sehr bald aus ihrem Arbeitsprogramm beseitigten. Bis in die Neuzeit hinein ist daher Merkur von den Astronomen fast ausschließlich zum Zwecke von Messungen im Fernrohr eingestellt worden. Mikrometrische Bestimmungen ergaben dabei für den Durchmesser dieses relativ sehr kleinen Planeten 4770 km, also wenig mehr als den dritten Teil des Erddurchmessers, ohne Andeutung einer Abplattung. Um bei dieser Gelegenheit auch die anderen kosmischen Verhältnisse des Merkur zu erledigen, sei erwähnt, daß sein Abstand von der Sonne 58 Millionen km, der Umlauf, also das Merkurjahr, 88 Tage beträgt. Die kosmische Stellung des Planeten zur Sonne wiederholt sich also regelmäßig in dem eben genannten Zeitintervall. Die relative Lage zur Erde, also z. B. die Aufeinanderfolge der Konjunktionen und Elongationen, ist naturgemäß auch von der Ortsänderung des Beobachters abhängig. Wegen der gleichen Bewegungsrichtung der Erde um die Sonne erfordert die Wiederholung dieser Erscheinungen eine längere Zeit, die man auch als synodischen Umlauf zu bezeichnen pflegt. Diese Periode beträgt bei Merkur 116 Tage; bei Beobachtung einer günstigen Stellung des Planeten läßt sich somit der nächste Termin ähnlicher Sichtbarkeitsbedingungen in einfacher Weise berechnen.

Rotationsfrage.

Beobachtungen des Planeten Merkur, die eine Erforschung seiner Oberfläche nach bestimmten Gesichtspunkten zum Ziele hatten, sind im vergangenen Jahrhundert eigentlich nur von Schröter in Liliental und später in den achtziger Jahren von Schiaparelli in Mailand ausgeführt worden. Sie hatten in erster Linie die astronomisch sehr interessante Frage nach der Umdrehungszeit des Planeten zum Ziel. Es kann nicht behauptet werden, daß die Bemühungen zu einem einwandfreien Resultate geführt hätten. Man darf aus den angefertigten Skizzen und Zeichnungen der beiden Astronomen sowie aus den Mitteilungen gelegentlicher sonst zuverlässiger Merkurbeobachter lediglich entnehmen, daß um die Zeit der Elongationen, also zu denjenigen Zeiten, wo der Planet der Erde in Viertelphase erscheint, in guten Fernrohren und bei günstigen Luftverhältnissen auf seiner Oberfläche einige schwache, sehr diffuse Schattenzüge mit großer Mühe und Anstrengung wohl

zu erkennen sind. Sie sind aber weder genauer zu beschreiben noch anders als in den gröbsten Zügen zeichnerisch darzustellen. Immerhin glaubte Schiaparelli aus der Unveränderlichkeit des Planetenanblicks an einigen aufeinanderfolgenden Tagen den Schluß ziehen zu dürfen, daß Merkur sehr langsam, wahrscheinlich in derselben Zeit sich um die Achse dreht, in der er einen vollen Umlauf um die Sonne ausführt. Dieses Resultat ist nicht unwidersprochen geblieben, und die ganze Frage nach der Achsendrehung des innersten Planeten muß nach wie vor offen bleiben.

Physische Beschaffenheit.

Eine der Umlaufszeit gleiche Rotationszeit würde bei Merkur auf ähnliche physische Verhältnisse hinweisen, wie wir sie bei unserem Erdmonde kennen, und die durch das gänzliche Fehlen von Luft und Wasser sowie durch eine rauhe, stark zerklüftete Oberfläche charakterisiert sind. Es ist nun recht interessant, daß alle anderen indirekten Versuche, über den Planeten nähere Einzelheiten zu gewinnen, tatsächlich darauf hindeuten, daß ein Vergleich dieser kleinen Planetenwelt mit unserem Monde durchaus angebracht erscheint. Es muß hier vorausgeschickt werden, daß von dem Phasenwechsel des Mondes genaue Helligkeitsbestimmungen vorliegen, aus denen sich zunächst die sog. Albedo ableiten läßt, d. h. die Prozentzahl der Helligkeit, die der betreffende Himmelskörper von dem auffallenden Sonnenlicht zurückzustrahlen vermag. Diese Albedo ist für den Mond zu 0,13 gefunden worden, d. h. der Mond vermag im Durchschnitt von der Einheit des auffallenden Sonnenlichtes nur 0,13 zu reflektieren. Weiterhin ist festgestellt worden, daß die Struktur der Oberfläche unseres Trabanten das Licht der Phasen wesentlich beeinflußt, insofern, als durch den starken Schattenwurf in den Viertel- und Sichelphasen eine Dämpfung der Helligkeit gegenüber den Verhältnissen bei einer idealen glatten Kugel eintritt. Es ist nun ohne Frage merkwürdig, daß auch bei Merkur Albedo und Phasenwechsel nahe die gleichen photometrischen Effekte ergeben, wie wir sie beim Erdmonde vorfinden. Insbesondere kann der gefundene Albedowert von 0,14 innerhalb der unvermeidlichen Beobachtungsfehler als völlig identisch mit der oben für den Mond genannten Zahl gelten. Die Annahme ähnlicher physischer Verhältnisse bei den beiden Weltkörpern hätte also ohne Frage eine wissenschaftliche Begründung.

Atmosphäre.

Neben der Photometrie ist auch die Spektralanalyse auf den Planeten angewendet worden, obwohl gleich hier betont werden muß, daß wir uns von ihr bei dunklen, in reflektiertem Lichte leuchtenden Körpern nicht die großen Erfolge versprechen dürfen, an die wir uns auf dem Gebiete der Stellarastronomie gewöhnt haben. Was die prismatische Zerlegung des Planetenlichtes zu enthüllen vermag, ist lediglich das Vorhandensein einer dichteren Atmosphäre. Ist letztere sehr dünn und vielleicht obendrein von ähnlicher Zusammensetzung wie die unsrige, so werden die Ergebnisse höchst unsicher, da das direkte und das von der Planetenoberfläche reflektierte Sonnenlicht dann keinen merklichen Unterschied der Zusammensetzung zeigen. In dem speziellen Falle des Merkur ist z. B. der Nachweis einer Atmo-

sphäre spektroskopisch noch nicht erbracht worden, und man darf daher auf dem Planeten höchstens mit einer sehr dünnen Lufthülle rechnen. Daß in dieser Atmosphäre, wenn sie überhaupt vorhanden ist, keine intensivere Wolkenbildung stattfindet, beweist schon der geringe Prozentsatz des zurückgestrahlten Sonnenlichtes, den die erwähnten photometrischen Messungen ergeben haben.

Ähnlichkeit mit dem Monde.

Das physische Bild des Merkur scheint nach den obigen Darlegungen trotz des Fehlens direkter Oberflächeneinzelheiten greifbare Formen zu gewinnen. Eine tote, erstarrte Welt mit rauher Oberfläche ohne dichtere Atmosphäre mit einer Rotation, die bei senkrechter Achsenlage zur Bahnebene für die eine Halbkugel dauernden Tag bei fast ungeänderter Sonnenstellung, für die andere aber dauernde Nacht bedingen würde. Freilich dürfen auch die dieser Vorstellung weniger förderlichen Argumente nicht mit Stillschweigen übergangen werden. Was zunächst die Gleichheit von Rotations- und Revolutionszeit anbetrifft, wie wir sie bei unserem Monde vorfinden, so lassen sich die gewichtigen theoretischen Gründe, die für diese Gleichheit bei unserem Erdtrabanten sprechen, bei weitem nicht mit der gleichen Beweiskraft auf das System Sonne-Merkur anwenden. Ferner erwartet man bei einer ähnlichen Charakteristik zweier Weltkörper auch die ungefähre Übereinstimmung in einer Eigenschaft, die wir bei irdischen Gegenständen als spezifisches Gewicht bezeichnen und bei Metallen, Gesteinen usw. auch direkt als Hauptmerkmal anzusehen pflegen. Dieses spezifische Gewicht oder die Dichte beträgt bei unserem Monde nur 0,61 der Erddichte. Merkur dagegen zeichnet sich unter allen in dieser Hinsicht bisher untersuchten Weltkörpern durch seine sehr beträchtliche Dichte aus, die das 1,1 fache derjenigen der Erde, somit nahe das Zweifache des beim Monde gefundenen Wertes beträgt. Ist auch die mittlere Dichte eines Weltkörpers, wie unsere Erde selbst am deutlichsten zeigt, für die Dichte der Oberfläche durchaus nicht maßgebend, so ist hier der Unterschied doch groß genug, um zwischen den beiden Welten gewisse physische Verschiedenheiten vermuten zu lassen, über die wir allerdings vorläufig nichts Näheres anzugeben vermögen.

Venus.

Die Ergebnisse, die die physische Beobachtung des Planeten Venus im Laufe der drei Jahrhunderte seit Entdeckung des Fernrohrs gezeitigt hat, sind trotz der wesentlich günstigeren Sichtbarkeitsbedingungen dieses hellsten aller Planeten kaum vollständiger als das, was uns die Merkuroberfläche enthüllt hat. Tatsächlich ist der enorme Glanz dieses populärsten aller Planeten der Beobachtung eher hinderlich als förderlich. Den hellsten Fixstern des Himmels, Sirius, übertrifft die Venus unter den günstigsten Lichtverhältnissen um volle 2 Größenklassen, d. h. um das 6- bis 7fache. Trotz des starken Phasenwechsels bleibt die Gesamthelligkeit unseres nächsten Nachbarplaneten ziemlich unveränderlich. Während er sich von der oberen Konjunktion zur östlichen Elongation bewegt, wird die Zunahme des scheinbaren Durchmessers durch die Abnahme des beleuchteten Teils der Kugel kompensiert, und dieser Ausgleich bleibt auch dann noch bestehen, wenn die

Venus kurz vor und nach der unteren Konjunktion sich auch im kleinen Fernrohr als eine schmale Sichel mit einem Durchmesser von nahe einer Bogenminute dem Auge darstellt.

Helligkeit. Die Sichtbarkeit der Venus am hellen Tage ist früher als ein besonders interessantes Phänomen angesehen und in Chroniken und geschichtlichen Urkunden wiederholt erwähnt worden. Tatsächlich ist hierzu kaum etwas anderes nötig als ein genügender Abstand des Planeten von der Sonne, ein reiner klarer Himmel und eine ungefähre Kenntnis der Lage dieses Wandelsterns. Treffen diese Bedingungen zu, so gelingt es für gewöhnlich schon einem Durchschnittsauge, ihn auch bei vollem Tageslicht aufzufinden und dann auch ohne besondere Augenermüdung längere Zeit zu verfolgen. Im Fernrohr ist selbst in der Dämmerung bald nach Sonnenuntergang oder vor Sonnenaufgang der Glanz des Planeten bereits derartig störend, daß physische Beobachtungen kaum anders als am Tage zu erzielen sind, wenn man nicht ähnlich wie bei der Sonne zu schwachen Dämpfgläsern seine Zuflucht nehmen will. Aus allen diesen Tatsachen geht hervor, daß die Albedo der Venus einen sehr hohen Wert haben muß. Sie ist tatsächlich zu 0,76 bestimmt worden, entspricht also der Rückstrahlungsfähigkeit von frisch gefallenem Schnee.

Was die kosmischen Verhältnisse der Venus anbetrifft, so kommen sie denjenigen der Erde bereits wesentlich näher, als dies bei Merkur der Fall war. Der Abstand von der Sonne beträgt 108 Millionen km, die Umlaufszeit 225 Tage. Der Durchmesser, der ähnlich wie bei Merkur auf vollkommene Kugelgestalt hindeutet, mißt 12420 km, also fast genau ebensoviel wie der Durchmesser der Erde. Auch die Masse und Dichte des Planeten würde zunächst auf erdähnliche Beschaffenheit der Nachbarwelt hindeuten. Die erstere beträgt 0,82, die letztere 0,9 des entsprechenden für unseren Planeten gefundenen Wertes.

Versuche einer Umdrehungsbestimmung. Die Nachforschung nach Einzelheiten der Venusoberfläche zum Zwecke einer Umdrehungsbestimmung ist fast so alt wie das Fernrohr selbst, denn von jeher erschien kein anderer Wandelstern dem bewaffneten Auge unter einem so bedeutenden scheinbaren Durchmesser wie die Venus. Schon J. D. Cassini, der erste Organisator der Pariser Sternwarte, gab sich um die Wende des 17. Jahrhunderts die größte Mühe, über das Rätsel der Venusrotation Gewißheit zu erlangen, jedoch ohne positiven Erfolg. Die Sichel- und Viertelphasen zeigten wohl zuweilen graue, sehr zarte Schattierungen, aber alles Nachforschen nach einer Bewegung war vergeblich. Glücklicher in dieser Beziehung schienen Cassinis Sohn sowie Bianchini in Rom zu sein, von denen der erstere schließlich zu einer Umdrehungsperiode von $23^h\,15^m$, der letztere auf eine solche von $24\,^1/_3{}^d$ (!) geführt wurde. Zwar widersprachen die ein Jahrhundert später angestellten Beobachtungen Herschels dem Ergebnis Cassinis, doch schien es anderseits wiederum eine Bestätigung in dem Zahlenwert zu erhalten, den die 9jährigen Beobachtungen Schröters ergaben. Letzterer glaubte sogar außer leichten Schattierungen der Venusoberfläche in der Nähe des

Südhorns des Planeten Bergschatten wahrgenommen zu haben, aus deren wiederholtem Erscheinen sich eine Umdrehungsperiode von $23^h\ 21^m$ ableiten ließ.

Es würde hier zu weit führen, wollte man auch die weiteren Versuche, für den Planeten Venus eine Rotationszeit zu ermitteln, ausführlicher mitteilen, so die scheinbare Bestätigung des Cassini-Schröterschen Resultates durch De Vico in Rom, daneben Beers und Mädlers sowie Vogels negatives Resultat. Schon die verschiedenen, z. T. stark abweichenden Achsenneigungen, die die verschiedenen Anhänger der Tagesperiode für die Venus finden, und die zwischen 75^0 und 53^0 schwanken, deuten darauf hin, daß die Beobachtungen nicht durchweg reell gewesen sein können. Erst recht unklar wurde die Frage nach der Venusrotation, als Schiaparelli in Mailand auf Grund einer im Winter 1877—1878 angestellten Beobachtungsreihe ähnlich wie bei Merkur auch bei der Venus für eine Gleichheit von Rotations- und Revolutionsperiode, d. h. für eine Umdrehung von 225 Tagen eintrat. Bestätigungen und Widersprüche folgten nun rasch aufeinander, und in dem Streit der Meinungen ist es äußerst schwierig, den Wert der Wahrnehmungen nach dem kritischen Urteil und dem guten Auge der Beobachter — zwei Dingen, die man durchaus nicht immer in einer Person vereinigt findet — richtig zu bewerten.

Anwendung des Dopplerschen Prinzips.

In neuerer Zeit hat man besonders nach Villigers Untersuchung der physiologischen, bei Erleuchtung heller Kugeln eintretenden Phänomene auf die rein visuelle, wenig Aussicht bietende Methode der Umdrehungsbestimmung bei der Venus fast ganz verzichtet und ein anderes direkteres Verfahren eingeschlagen, das trotz der vorläufigen Mißerfolge wenigstens für die Zukunft ein Ergebnis verspricht. Es wird später noch zu zeigen sein, wie man heute bei dem gewaltigen Sonnenball die veränderliche Umdrehungsperiode einer jeden Zone dadurch bestimmen kann, daß man von Punkten des östlichen und westlichen Sonnenrandes genau übereinanderliegende Spektra entwirft und die dabei beobachteten Lageänderungen der Fraunhoferschen Linien im Sinne des Doppler-Fizeauschen Prinzips verwertet. Diese Linienverschiebung kann ihrer

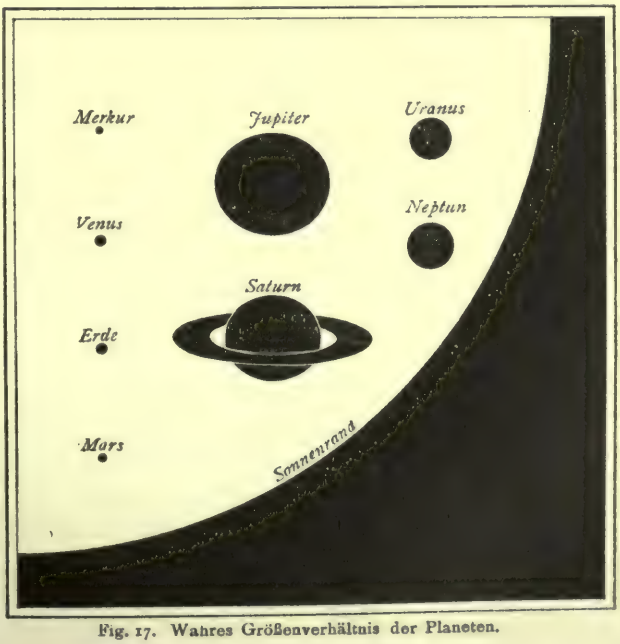


Fig. 17. Wahres Größenverhältnis der Planeten.

Größe nach gemessen und daraus unmittelbar die Bewegung der Lichtquelle in der Blickrichtung, also des einen Randes nach dem Beobachter zu, des anderen von diesem fort, berechnet werden. Die Venus wäre trotz der zu erwartenden äußerst geringen Verschiebungen für den gleichen Versuch wohl geeignet, könnte man auch hier stets mit zwei der Rotation nach entgegengesetzten Rändern und der Kenntnis der ungefähren Achsenlage rechnen, um äquatornahe, d. h. rasch bewegte Punkte des Planeten einstellen zu können. Nun ist aber der eine Rand des Planeten gerade in Erdnähe vollständig dunkel, und bezüglich der Achsenlage herrscht völlige Ungewißheit. Kein Wunder, daß die mit Hilfe des Dopplerprinzips erzielten Resultate, soweit sie überhaupt reell sind, sehr auseinandergehende Rotationswerte ergeben. Der russische Astronom Belopolski gelangte z. B. auf diesem Wege zu einer 12stündigen, Lowell gemeinsam mit Slipher zu einer 30tägigen Umdrehung, es sind also bei dem Planeten eigentlich sämtliche Möglichkeiten einer Rotationsdauer von wenigen Stunden bis zu einigen hundert Tagen erschöpft, ohne daß der Fachmann heute imstande wäre, für diese oder jene Vermutung entschiedener einzutreten. Die bis dahin angestellten Versuche zeigen jedenfalls, welche Schwierigkeiten sich oft der Lösung von scheinbar einfachen wissenschaftlichen Problemen entgegenstellen. Daß gerade solche Jahrhunderte alten Versuche besonderes Interesse und Popularität genießen, lehrt die tägliche Erfahrung. Sie werden trotz der früheren Mißerfolge immer wieder aufgegriffen, und so wird man ohne Zweifel auch über die Venusrotation früher oder später auf irgendeinem Wege ein positives Urteil gewinnen, obwohl nicht zu verkennen ist, daß es sich dabei um eine der schwierigsten astronomischen Aufgaben handelt.

Nachweis einer Atmosphäre.

Mit der von Schiaparelli befürworteten ewigen Nacht der einen und einem ebenso langen Tage der anderen Planetenhalbkugel nicht recht vereinbar ist das Vorhandensein einer dichten Atmosphäre auf der Venus. Schon der hohe Glanz des Planeten und das anscheinend vorübergehende Vorkommen von zarten Schattierungen auf seiner Oberfläche lassen auf eine dichte Wolkenhülle schließen. Ebenso ist auf Grund von spektroskopischen Beobachtungen das Vorhandensein einer der irdischen ähnlichen Lufthülle sehr wahrscheinlich gemacht. Daß eine Dunstschicht über der Venusoberfläche existiert, bedurfte allerdings kaum eines besonderen Beweises, nachdem man bei besonderen Gelegenheiten die Wirkung der atmosphärischen Absorption und Brechung bei unserem Nachbarplaneten unmittelbar beobachtet hatte. Um die Zeit der Sichel- und Viertelphasen läßt sich nämlich, besonders bei Tagesbeobachtungen, eine gewisse Abschattierung der Lichtgrenze gut erkennen, und das gleiche scheint bei den Rändern des Planeten der Fall zu sein. Steht der Planet gar als äußerst feine Sichel am Himmel, so ist zuweilen ein Übergreifen der Hörnerspitzen über die geometrische Lage hinaus, ja selbst ein vollständiges Zusammenschließen des Lichtsaumes zu einem vollständigen Ringe beobachtet worden, dessen Zustandekommen kaum anders als durch Lichtbrechung in der Venusatmosphäre zu erklären

ist. Auf dieselbe Ursache ist vielleicht auch die Wahrnehmung des vollen, dunklen Planetenumrisses bis zu 19 Minuten vor Beginn und nach Schluß der Venusdurchgänge vor der Sonnenscheibe zu schieben, wobei zu betonen ist, daß die Erscheinung hier mehrfach, dagegen nie bei den viel häufiger stattfindenden Vorübergängen des Merkur beobachtet wurde.

In das Kapitel der Dämmerungsphänomene ist vielleicht auch eine ebenso oft bestrittene wie behauptete Erscheinung zu verweisen, die in einem schwachen Leuchten der Nachtseite der Venus besteht und einen ähnlichen Effekt hervorruft, wie bei unserem Monde das Erdlicht vor und nach der Neumondphase. Da Venus, wie wir heute wissen, einen Satelliten nicht besitzt, so muß der Grund des Phänomens im Planeten selbst zu suchen sein, falls es sich nicht überhaupt um eine rein subjektive Wahrnehmung handelt. Nach Messungen der Flächenhelligkeit des grauen Erdlichtes auf dem Monde läßt sich wohl ein Schluß auf eine recht hohe Albedo unseres Planeten ziehen, so daß vielleicht die Erde zur Erklärung der Erscheinung herangezogen werden könnte. In der Tat würde bei gleicher Albedo die Erde der Venus im günstigsten Falle etwa elfmal so hell erscheinen wie die Venus uns Erdbewohnern, doch ist es trotzdem sehr fraglich, ob diese Helligkeit genügt, um den Lichteffekt, der sehr oft auch am Tage oder in der Dämmerung beobachtet wurde, zu erklären. Es fehlt auch hier nicht an Deutungen, die sich auf die Analogie mit irdischen Erscheinungen atmosphärischer Elektrizität stützen, jedoch vorläufig durchaus hypothetischen Charakter haben.

Obere Planeten.

Schon ein flüchtiger Blick auf eine schematische Skizze der Planetenbahnen zeigt, daß die physische Erforschung der sog. oberen Gruppe, also der Wandelsterne von Mars an aufwärts, wesentlich günstigere Beobachtungsbedingungen verspricht. Gerade umgekehrt wie bei den unteren Planeten umschließen diese Weltkörper die Erdbahn und erscheinen infolgedessen dann voll von der Sonne erleuchtet, wenn sie der Erde am nächsten, d. h. in der Opposition stehen. In der Nähe der Konjunktionen mit der Sonne sind die Beobachtungsbedingungen wesentlich ungünstiger, doch spielt der Unterschied lediglich bei Mars eine größere Rolle. Von Jupiter an haben wir es bereits mit so gewaltigen Entfernungen zu tun, daß der zwischen dem größten und geringsten Abstand des Planeten bestehende Unterschied von einem Erdbahndurchmesser keine nennenswerte Rolle in den Sichtbarkeitsbedingungen mehr spielt. Aus Jupiterferne und erst recht aus Saturnferne betrachtet, erscheint die Erde lediglich als ein naher Trabant der Sonne, und umgekehrt wäre es für die Beobachtung aller oberen Planeten von Jupiter aufwärts ziemlich gleichgültig, ob wir unseren Standpunkt behalten oder ihn von der Erde auf die Sonne verlegen würden. Damit kommt bei diesen fernen Welten wenigstens der Phasenwechsel, der bei den unteren Planeten so störend auftritt, in Fortfall.

Mars.

Bei unserem oberen Nachbargestirn im Sonnensystem, dem Planeten Mars, spielen allerdings die Entfernungsverhältnisse gegenüber der Erde noch eine so große Rolle, daß er bald durch seinen außerordentlichen Glanz die Augen auf sich lenkt, bald unter den schwächeren Vertretern der Sterne

erster Größe ein unscheinbares Dasein führt. Das Licht, das er uns in günstigen Oppositionen zusendet, übertrifft dabei die geringste Helligkeit um mehr als das 60fache. Die dem Planeten um die Zeit des größten Glanzes gewidmete Aufmerksamkeit ist z. T. auch auf seine eigentümliche gelbrote Färbung zurückzuführen, die unter den Planeten einzig dasteht. Nicht mit Unrecht wird er schon im Sanskrit mit einer glühenden Kohle verglichen. Die Albedo des Mars ist verhältnismäßig gering, denn seine Oberfläche vermag nur 0,22 des auf sie auffallenden Sonnenlichtes zurückzustrahlen. Die Venus mit ihrem mehr als dreifachen Albedowert und einer viermal größeren Oberfläche würde, an die Stelle des Mars gesetzt, wie ein kleiner Mond an unserem Nachthimmel strahlen. Der starke Lichtwechsel, dem Mars während seines vollen Umlaufes unterliegt, beschäftigte schon im Altertum die Gemüter, doch gelang der vorkopernikanischen Zeit hier ebensowenig eine Lösung, wie bei dem Versuch einer Deutung der verwickelten Bewegungsverhältnisse des Planeten.

Die Messungen im Fernrohr haben ergeben, daß Mars eine sehr wenig oder gar nicht abgeplättete Kugel von 6780 km Durchmesser bildet, die in 687,0 Tagen die Sonne umkreist. Die mittlere Entfernung von der Sonne beträgt dabei 228 Millionen km, so daß unter Berücksichtigung des Erdbahnradius von 150 Millionen km der Mars während der Konjunktion im Mittel 380 Millionen km, während der Opposition 80 Millionen km von uns entfernt ist. Wegen der Exzentrizität der Marsbahn können diese Mittelwerte bis zu 400 Millionen km ansteigen bzw. bis zu 55 Millionen km abnehmen. Im letzteren Falle erhält man eine sog. Perihelopposition, wie sie sich bei Mars in Zwischenzeiten von durchschnittlich 15 Jahren wiederholen. Diese „großen“ Oppositionen waren es auch, die bisher die meisten Aufschlüsse über die physische Beschaffenheit des Planeten ergeben haben. Im übrigen folgen die Oppositionen regelmäßig in Zwischenzeiten von 2 Jahren und 49 Tagen aufeinander und bieten dann 3—4 Monate hindurch zu physischen Beobachtungen reichliche Gelegenheit. Die Masse des Mars beträgt 0,11 der Erdmasse, woraus hervorgeht, daß sich aus der Erde neun Kugeln von der gleichen Dichte wie Mars gestalten ließen. Dem Rauminhalt nach würde man, wie das aus der Größe des Durchmessers folgt, fast 7 Marswelten aus der Erde formen können. Da der Quotient aus Masse durch Volumen der Dichte entspricht, so folgt aus den Zahlenwerten für Mars nur 0,7 der Erddichte.

Bestimmung der Rotationszeit.

Wenn auch nähere Aufzeichnungen darüber fehlen, so unterliegt es doch kaum einem Zweifel, daß der rote, von jeher das Interesse der Beobachter erregende Planet zu den ersten im Fernrohr eingestellten Himmelsobjekten zählte. Diese Beobachtungen mögen allerdings wenig ermutigend gewesen sein. Sie konnten kaum mehr feststellen, als daß der Planet im Fernrohr eine Scheibe von merklich wechselndem Durchmesser darbot, die von Zeit zu Zeit, entsprechend der räumlichen Stellung, eine schwache, kaum bis zu $^1/_{10}$ des Durchmessers reichende Lichtphase zeigte. Einzelheiten auf

seiner Oberfläche wurden zwar bereits zwischen 1636 und 1660 von Fontana, Zucchi, Bartoldi, Huygens und anderen wahrgenommen, man bemerkte wohl auch, daß diese Flecken ihre Stellung zu der Planetenbegrenzung änderten, doch war es erst J. D. Cassini vorbehalten, für die Umdrehungszeit des Mars einen sicheren Wert abzuleiten. Diese Rotationszeit, die Cassini zu rund $24^h\,40^m$ bestimmte, blieb $1\frac{1}{2}$ Jahrhunderte hindurch die einzige wesentliche Errungenschaft der Marsforschung. Einen genaueren Zahlenwert für die Umdrehung sowie eine erste Karte des Planeten lieferten erst um das Jahr 1830 die fleißigen Beobachtungen von Beer und Mädler, denen überhaupt auf dem

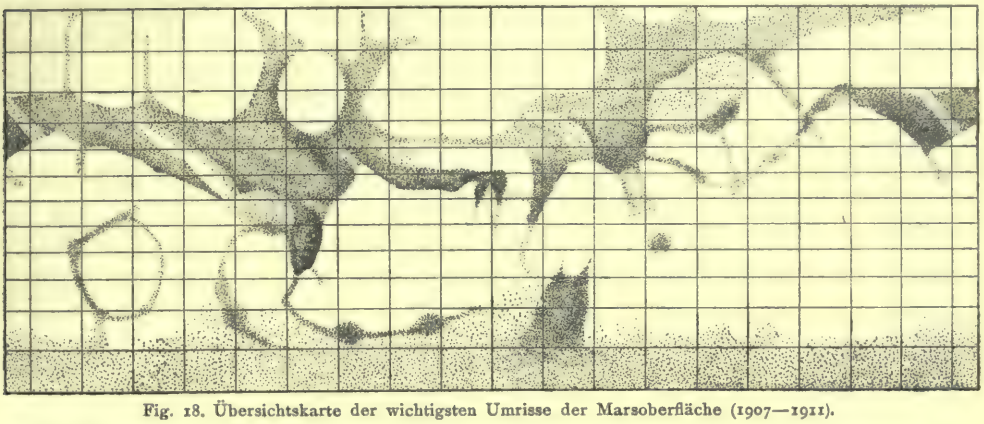


Fig. 18. Übersichtskarte der wichtigsten Umrisse der Marsoberfläche (1907—1911).

Gebiete wissenschaftlicher Planetenforschung ein besonderes Verdienst zukommt. Heutzutage ist die Umdrehungszeit des Mars, $24^h\,37^m\,22{,}6^s$, bis auf kleine Bruchteile einer Sekunde gesichert, und die wichtigeren Oberflächeneinzelheiten sind auf Grund von Zeichnungen und Messungen genau in Karten festgelegt (Fig. 18).

Die weißen Polflecke.

Neben der Umdrehung des Planeten, deren Periode so auffällig mit dem irdischen Tage übereinstimmt, ist ohne Frage auch die Achsenneigung gegen die Marsbahn, also der Wert, der unserer Schiefe der Ekliptik entspricht und die Verteilung der Jahreszeiten auf einem Weltkörper bestimmt, von Interesse. Nun ist die Richtung der Marsachse nicht nur durch die Fleckenbewegung, sondern auch durch eine weitere Eigentümlichkeit des Mars gekennzeichnet, die ihm im Fernrohr auf den ersten Blick eine große Erdähnlichkeit verleiht: an seinem Nordpol und Südpol bemerkt man je eine weiße Kappe, die bereits Huygens, Maraldi und Cassini aufgefallen war und schon damals mit den Schnee- und Eisgebieten der irdischen Pole verglichen wurde. Die Polflecke zeigen eine wechselnde Ausdehnung, sind auch nicht immer gleichzeitig zu beobachten, denn bei den Periheloppositionen kehrt uns Mars ein wenig den Südpol, bei seinen Apheloppositionen den Nordpol zu. Erst Herschels aufmerksamen Beobachtungen gelang es, diesem Wechsel eine kosmische Deutung zu geben und gleichzeitig den Nachweis zu liefern, daß die Ausdehnung der weißen Marsflecke mit den Jahreszeiten des Planeten zusammenhängt, derart, daß sie bei höherem Sonnenstande zusammen-

schmelzen, bei niederem sich weiter ausbreiten. Diese Tatsache, in Verbindung mit dem Wert der Schiefe der Marsekliptik, den Herschel zu rund 24° fand und der auch heute noch kaum verbesserungsbedürftig ist, sowie die dem Erdentage nahe gleiche Rotationsdauer führten Herschel zu der Ansicht, daß die Marsbewohner, falls es solche gibt, „sich wahrscheinlich einer in vieler Hinsicht ähnlichen Situation wie wir erfreuen." Diese Feststellung hat fortan dem Planeten Mars unter allen seinen Geschwistern im Sonnensystem ein besonderes Interesse in physischer Beziehung gesichert.

Deutung der gelben und grauen Gebiete.

Waren die weißen, von den Jahreszeiten des Planeten abhängigen Polkappen des Mars kaum anders als im Sinne der irdischen Eisgebiete an den Polen zu deuten, so gestaltete sich die Erklärung der gelben und grauen Flecke der Planetenscheibe weniger einwandfrei. Wir müßten ja mit allen unseren Erfahrungen und Vorstellungen nicht an die Erde gebunden sein, wenn wir nicht eine zweifache Farbentrennung einer Planetenoberfläche in erster Linie als eine Trennung von Land und Wasser auffassen sollten. Solange man die Umrisse dieser Flecken auf Mars genauer erkannt und sie kartographisch festgelegt hat, haben sich die meisten Beobachter dafür ausgesprochen, daß die grauen Gebiete Wasser, die helleren bräunlichen Flecken feste Kontinente darstellen könnten. Da sich über den Anblick der Umrisse der Erdoberfläche für einen im Weltraum befindlichen Beobachter nur Vermutungen anstellen lassen, so kann die genannte Deutung der Marsflecken lediglich den Wert einer Hypothese haben, über deren Berechtigung sich sehr wohl streiten läßt. Wenn wir also heute auf einer Marskarte Bezeichnungen wie Mare Tyrrhenum, Mare Sirenum, Mare Australe, eine Syrtis Major usw., oder „Landgebiete" wie Aeria, Elysium, Deucalionis Regio und andere vorfinden, so darf nicht übersehen werden, daß diese Namen sich später möglicherweise als unzutreffend, wenn nicht als ebenso absurd erweisen können wie die Nomenklatur des Mondes, die auf dem luft- und wasserlosen längst erstarrten Antlitz unseres Begleiters noch „Meere" und „Sümpfe" kennt.

Die heute allgemein gebräuchliche Bezeichnung der Marsformationen, von der soeben einige Beispiele genannt wurden, ist auf den italienischen Astronomen Schiaparelli zurückzuführen, dessen Name im Zusammenhange mit der Erforschung von Merkur und Venus bereits erwähnt wurde. Einem vorzüglichen Auge und einem ebensolchen Fernrohr hatte er es zu verdanken, daß schon seine ersten, im Jahre 1877 angestellten Beobachtungen der Marsoberfläche in bezug auf Reichhaltigkeit der Einzelheiten die hervorragendsten Leistungen aller Vorgänger weit in den Schatten stellten. Auf den Übersichtskarten, auf denen Schiaparelli von dem genannten Jahre an von Opposition zu Opposition die Oberfläche des Planeten mit stetiger Vervollkommnung festgelegt hat, erkennt man zunächst fast alle deutlicheren Angaben der älteren Beobachter wieder. An der Beständigkeit der Grundumrisse der Planetenoberfläche war somit kein weiterer Zweifel mehr möglich. An dieses grobe, durch die Bemühungen von zwei Jahrhunderten gewonnene Um-

rißbild schloß sich jetzt Schiaparellis Detailarbeit an. Jedes kleinste Fleckchen, jede Schattierung wurde sorgfältig verfolgt und, wenn es möglich war, auch mikrometrisch ausgemessen.

Die sogenannten Marskanäle.

Durch eine seltsame Entdeckung erhielten die Schiaparellischen Karten bald eine besondere Bedeutung. Die gelben, hier und da ins Bräunliche spielenden Gebiete, die man bis dahin für Länder und Inseln ansah, erwiesen sich bei günstigsten Luftverhältnissen von grauen Linien durchquert. Was lag näher, als diese Linien für Wasserstraßen anzusehen, die in Gestalt eines weitverzweigten Netzes die Kontinente unserer interessanten Nachbarwelt durchsetzten? Jetzt schien tatsächlich jeder Zweifel an erdähnlichen Daseinsbedingungen auf einem Planeten beseitigt. Sosehr sich die Astronomen auch dagegen wehren mochten, der Planet Mars war mit Schiaparellis Entdeckungen für die nächsten Jahrzehnte jeder Spekulation ausgeliefert. Da vollzieht ein Erdenstern in unserer nächsten Nähe seine Bahn um die Sonne. Sein Tag und seine Nacht, die Lage seiner Jahreszeitenzonen, also die Hauptbedingungen der gegenwärtigen Entwicklungsform der Erde, stimmen mit dieser fast vollständig überein. Die Pole dieses merkwürdigen Planeten sind mit einer Eis- oder Schneedecke überzogen, die sich bei höherem Sonnenstande ganz oder teilweise zurückzieht; wir sehen Festländer und Meere, auch Inseln und anscheinend nur zeitweise vom nassen Element überflutete Gebiete. Wenn nun gar von einem der erfolgreichsten und universellsten Himmelsforscher noch Wasseradern festgestellt werden, die geradlinig die Länder durchziehen — wer wollte wohl den Mut finden, gegen die logische Laienfolgerung ernstlich zu Felde zu ziehen, die einen so gestalteten Weltkörper mit vernunftbegabten Geschöpfen bevölkert sehen möchte und von den berufenen Vertretern der Wissenschaft eine entsprechende Entscheidung verlangt?

Fig. 19. Skizze des Mars mit der großen Syrte am 16. Dez. 1911.

Neuere Ansichten über die „Kanäle".

Es wäre ein müßiges Beginnen, wollte man hier alle Enttäuschungen schildern, die die letzten großen Oppositionen in bezug auf die Bewohnbarkeitsfrage des Mars gebracht haben. Inmitten des Streites vergaß man, daß die von Schiaparelli beobachteten Linien nur wie ein leichter Hauch die Marsoberfläche überlagern und daher kaum anders als in schematischer Form darzustellen sind; man übersah, daß gerade die größten Fernrohre von den Rätseln der Marskanäle sehr wenig erkennen ließen, wohl der beste Beweis dafür,

wie subjektiv unsere Auffassungen werden, wenn die Empfindung einmal hart an der Grenze der Sinneswahrnehmung liegt.

Wie bei jedem interessanten Ergebnis, das nicht einwandfrei feststeht, hat die Schiaparellische Auffassung der Struktur des Marsantlitzes einerseits kategorische Bestätigung, andererseits energischen Widerspruch erfahren, und die Zweifel sind trotz der ernsten Arbeit, die in den letzten zwei Jahrzehnten in der Erforschung der Marsoberfläche geleistet wurde, auch heute noch nicht vollständig geklärt. Unter den Verfechtern eines geometrischen, auf vernunftbegabte Wesen zurückzuführenden Oberflächenbildes unseres Planeten begegnen wir an erster Stelle dem Amerikaner Lowell, der speziell für die Marsforschung ein Höhenobservatorium in den Anden errichtet und mit seinen Mitarbeitern auch auf anderen Gebieten der Himmelskunde wertvolle Resultate erzielt hat. Die schematische Darstellung des Kanalnetzes hat Lowell von allen Beobachtern wohl am weitesten getrieben. Geradlinige Striche, kreisrunde Flecke, scharfe geometrische Begrenzungslinien der Kontinente und Inseln bilden das charakteristische Merkmal seiner Marskarten, die von Amerika aus ihre Runde durch die Welt gemacht haben. In dieser Auffassung wird bei uns niemand, der den Mars auch nur einmal bei günstigen Luftverhältnissen im Fernrohr gesehen hat, dem amerikanischen Astronomen folgen können. Mit Recht ist darauf hingewiesen worden, daß der wissenschaftliche Wert dieser Skizzen, die das wirklich Gesehene verschleiern und den Laien vollkommen irreführen, sehr gering sei. Gerade bei einer so schwierigen zeichnerischen Aufgabe, wie sie die Marsoberfläche dem Beobachter bietet, kann lediglich die gewissenhafteste Wiedergabe der gesehenen Einzelheiten unter richtiger Einschätzung des Erreichbaren unsere Anschauungen über die Oberfläche einer fremden Welt fördern. Die von Antoniadi am großen Refraktor in Meudon bei Paris während der Oppositionen 1909 und 1911 mit seltenem Geschick hergestellten Abbildungen des Mars kommen anscheinend dem erstrebten Ziel sehr nahe, und es ist heute kaum noch zu zweifeln, daß die komplizierten Marsphänomene schließlich auch ohne Zurückgreifen auf höhere Lebensformen eine sehr natürliche Deutung zulassen werden. Die wichtigsten Umrisse der Schiaparellischen und auch der Lowellschen Karten bleiben demnach als reelle Gebilde bestehen, nur an Stelle der scharfen Linien und Streifen tritt eine differentielle Auflösung in dunkle Flecken und Bänder von z. T. sehr unregelmäßigen Umrissen. Gerade die größten und besten Instrumente der Gegenwart sprechen in ihren Ergebnissen für die von Antoniadi vertretene Auffassung. Es gibt ja auch in der Mikroskopie, die sonst unter wesentlich günstigeren Bedingungen arbeitet wie das Fernrohr, Objekte, wie z. B. einzelne zur Prüfung der Auflösungskraft der Objektive gebrauchte Diatomeen, die, je nach der Vollkommenheit der benutzten Optik, eine vollständig verschiedene Struktur zeigen. Es ist wohl bei diesen Beobachtungen statthaft, daran zu zweifeln, ob schließlich die mit den besten optischen Systemen erhaltene Auffassung der wahren Struktur dieser Gebilde entspricht, es wird aber wohl niemand einfallen, ein mit geringerer Optik er-

haltenes Bild als das der Wahrheit näherkommende anzusehen. Von dem gleichen Gesichtspunkte aus betrachtet kann die ganze „Kanalhypothese" der Marsoberfläche heute bereits als erledigt gelten.

Photographische Aufnahmen des Mars.

Wohl den besten Beweis für ein durchaus natürliches, wenngleich in seinem inneren Zusammenhange noch durchaus ungeklärtes Aussehen des Marsantlitzes hat übrigens Lowell selbst durch die photographischen Aufnahmen des Planeten geliefert. Diese Photographien, die nach außerordentlich mühseligen, langjährigen Versuchen schließlich erzielt worden sind, stellen kleine Meisterwerke der photographischen Kunst dar und erreichen, nach den letzten Proben zu schließen, in bezug auf Einzelheiten bereits nahezu die Ergebnisse direkter visueller Beobachtungen an den besten Instrumenten der Neuzeit. Letzthin haben auch Hale auf dem Mount Wilson und Barnard auf der Yerkes-Sternwarte bei Chicago hervorragende Resultate in der Marsphotographie erzielt, so daß zur Lösung der alten Zweifel jetzt auch die photographische Natururkunde herangezogen werden kann. Diese Photographien zeigen trotz der gegenteiligen Behauptungen Lowells nicht die geringste Spur einer regelmäßigen Struktur auf dem Mars, sind auch dazu außerstande, da auf den kleinen, nur wenige Millimeter fassenden Negativen schon das Plattenkorn so feine Einzelheiten wie die hypothetischen Kanäle völlig verdecken würde.

Zum Leben auf unserer Erde gehört in erster Linie Luft und Wasser, und da nun einmal Mars derjenige Planet unseres Sonnensystems ist, der die größte Erdähnlichkeit aufweist, so muß vor allem über das Vorkommen dieser Lebensbedingungen auf seiner Oberfläche Klarheit herrschen, bevor man sich an irgendeine Spekulation heranwagt.

Atmosphäre.

Das Vorhandensein einer Atmosphäre wird allerdings schon durch die geringere Schärfe der Lichtgrenze, durch zeitweilige Trübungen der Details, schließlich durch das Auftreten vorübergehender glänzender Flecke von weißlicher oder gelber Färbung bewiesen, die kaum etwas anderes als Wolken sein können. Die zuweilen beobachteten, nie besonders auffälligen Ausbuchtungen an der Lichtgrenze sind wahrscheinlich nicht auf Bodenerhebungen, sondern gleichfalls auf Wolkengebilde zurückzuführen. Damit, sowie durch die weißen Polflecke wäre auch ein nicht unbeträchtlicher Feuchtigkeitsgehalt der Marsatmosphäre nachgewiesen. Direkte Beweise für das Vorkommen von größeren Wassergebieten in Gestalt unserer Meere besitzen wir natürlich nicht, denn die grauen Flecke lassen auch jede andere Deutung zu und sind auch tatsächlich wiederholt als Vegetationsgebiete angesprochen worden. Aus den zahlreichen mühevollen Versuchen, die Marsluft spektroskopisch einwandfrei festzustellen oder sie gar zu analysieren, kann man nur folgern, daß die Marsatmosphäre erheblich dünner ist als die unsrige, in ihrer Zusammensetzung dagegen dieser gegenüber vielleicht kaum wesentliche Unterschiede aufweist. Genau ebenso, wie es äußerst voreilig war, den Planeten Mars mit Vertretern einer höheren Kultur zu bevölkern, ebenso unwissenschaftlich wäre es daher, wenigstens die Möglichkeit von erdähnlichen Lebensbedingungen auf dem Pla-

neten zu leugnen. Damit müssen wir uns aber vorläufig begnügen, wenn wir den festen Boden wissenschaftlicher Ergebnisse nicht verlassen wollen. Eine Umschau in früheren Erdformationen gibt durch die stets dominierende Stellung des flüssigen Elements, durch die Eisfreiheit der Pole u. a. m. für die Oberfläche des Mars keine besseren Vergleichsobjekte wie die gegenwärtige Entwicklungsperiode unseres Planeten, und die zukünftige Gestaltung der Erde vermag auch die kühnste Phantasie nicht vorauszusagen.

Die kleinen Planeten zwischen Mars und Jupiter.

Die Entfernung, die uns von der nächsten großen Schwesterwelt im Sonnensystem trennt, ist bereits so groß, daß man von vornherein jede Fernrohrbeobachtung in diesem Abstande aufgeben könnte, würde es sich auch hier lediglich um eine Welt von der Größenordnung der Erde oder gar des Mars handeln. Glücklicherweise wird aber von Jupiter aufwärts der Abstand der Planeten durch ihre gewaltigen Dimensionen zum Teil ausgeglichen. Abgesehen von der rein formellen Trennung der Planeten in untere und obere ist somit noch eine weitere Scheidung nach kosmogonischen Gesichtspunkten in eine Gruppe von kleineren Wandelsternen, unter denen die Erde, und eine Gruppe von wesentlich größeren, in der Jupiter durch seine gewaltige Größe dominiert, notwendig. Diese beiden Gruppen werden auch als innere und äußere Planeten unterschieden, eine Trennung, die noch nahe 200 Jahre nach Entdeckung des Fernrohrs auch in einer deutlichen räumlichen Lücke zwischen beiden zu bestehen schien. Heute wissen wir, daß dieser weite, vielumstrittene Raum zwischen Mars und Jupiter von einer großen Schar kleiner Welten bevölkert ist, deren bisher festgestellte Zahl sich bereits dem ersten Tausend nähert. In bezug auf seine Bewegung ist der kleinste dieser Planeten dem größten Riesenkörper im Sonnensystem vollständig ebenbürtig, denn für die kosmische Umlaufsbewegung ist es in gewissem Grade gleichgültig, welche Quantität von Materie in einem Planeten vereinigt ist.

Während die kleinen Planeten, wie wir im vorigen Kapitel sahen, in der kosmischen Bewegungs- und Störungstheorie durch die Fülle von Beispielen, die sie liefern, eine sehr wichtige Rolle spielen, kommen sie für irgendeine nennenswerte physische Beobachtung kaum in Frage. Denn wegen ihres geringen Durchmessers erscheinen die meisten derselben auch in den größten Fernrohren fast punktförmig, so daß auf ihrer Oberfläche durchaus keine Einzelheiten wahrgenommen werden können; spektroskopische Beobachtungen, die auch kaum irgendein wichtiges Resultat erwarten lassen würden, sind wegen der Lichtschwäche dieser kleinen Planeten ausgeschlossen, und so bleibt als einziges astrophysikalisches Hilfsmittel nur die Photometrie, die Helligkeitsmessung übrig, die immerhin einige wertvolle Resultate ergeben hat. Die beobachtete Helligkeit ist natürlich nicht konstant, sondern hängt von der wechselnden Entfernung des Planeten von Sonne und Erde und von der Phase der Beleuchtung ab. Der Einfluß der Phase macht sich durch Helligkeitsänderungen, die mitunter bis zu einer vollen Größenklasse gehen, bemerkbar. Einige Asteroiden zeigen auch geringe Helligkeitsschwankungen nach Art der veränderlichen Sterne. Diese Erscheinung wurde zuerst bei

Eros nachgewiesen, dessen Lichtwechsel im Winter 1900—1901 eicht zu erkennen war und vom Minimum zum Maximum gerechnet etwa $2\frac{1}{2}$ Stunden in Anspruch nahm. Später zeigte sich die Veränderlichkeit entweder gar nicht oder nur undeutlich. Derartige periodische Lichtänderungen würden sich bei genügender Beständigkeit durch eine Achsendrehung der Planeten einfach erklären lassen.

Atmosphären scheinen diese Körper nicht zu besitzen. Ihr Vermögen, Licht zu reflektieren, wird daher nur von der Beschaffenheit der Oberfläche und der stofflichen Zusammensetzung der äußersten Schicht abhängen. Wenn nun auch gewiß nicht alle Asteroiden denselben Bruchteil des sie treffenden Lichtes wieder aussenden, d. h. nicht dieselbe Albedo besitzen, so scheinen doch die photometrischen Messungen bei verschiedenen Phasenwinkeln die Annahme zu rechtfertigen, daß die Albedo der Asteroiden im allgemeinen innerhalb enger Grenzen liegt, die ungefähr der Albedo des Merkur (0,14) und der des Mars (0,22) entsprechen.

Wird die Albedo eines Asteroiden von bekannter Bahn als gegeben betrachtet, so läßt sich aus der Oppositionshelligkeit der scheinbare und wahre Durchmesser des Körpers berechnen. So bestimmte G. Müller (Potsdam) aus seinen photometrischen Messungen unter der Annahme der Albedo 0,22 die folgenden Durchmesser:

Planet	Nach Müller, für Albedo 0,22		Nach Barnards mikrometrischen Messungen	
	scheinbarer Durchmesser in mittlerer Entfernung	wahrer Durchmesser	wahrer Durchmesser	Albedo
Ceres	0,38″	758 km	768 km	0,22
Pallas	0,28	564 „	489 „	0,24
Vesta	0,44	754 „	385 „	0,31
Juno	—	—	193 „	—
Eunomia	0,14	274 „	—	—
Lutetia	0,08	226 „	—	—
Daphne	0,06	114 „	—	—

Direkte Bestimmungen des Durchmessers dieser kleinen Planetenscheibchen sind nur mit den allerbesten Hilfsmitteln möglich gewesen. So hat Barnard mit den großen Refraktoren der Lick- und der Yerkes-Sternwarte die in der Tabelle aufgeführten Durchmesser der vier größten Planetoiden gemessen, aus deren Vergleichung mit den photometrisch abgeleiteten Dimensionen hervorgeht, daß die Fehler der Albedoannahme sehr stark in das Endergebnis eingehen. Bei der Unsicherheit der direkt wie indirekt erhaltenen Dimensionen können die Zahlenwerte der Tabelle kaum mehr als eine ungefähre Vorstellung von der Größe der bedeutenderen kleinen Planeten vermitteln. Die große Mehrheit der Asteroiden hat Durchmesser, die weit unter 100 km liegen, und ihre Gesamtmasse ist so gering, daß sie zusammengenommen noch nicht den dritten Teil einer Weltkugel von den Dimensionen des Merkur ergeben würden.

Jupiter. In nächster Nachbarschaft dieser winzigen Himmelskörper kreist um die Sonne das bei weitem bedeutendste Mitglied unserer Planetenfamilie, der Planet Jupiter. An Helligkeit wird er von Venus trotz seines mehr als siebenmal größeren Sonnenabstandes im Durchschnitt nur etwa um eine Größenklasse übertroffen, doch wird der geringe Unterschied durch seine Sichtbarkeit in dunkler Nacht fast vollkommen wett gemacht. Nur wenn beide Planeten einmal nebeneinander am Abend- oder Morgenhimmel zu finden sind, wird man auf den Unterschied des Glanzes aufmerksam.

Der Abstand des Jupiter von der Sonne beträgt im Mittel 778 Millionen km, und 11 Jahre 315 Tage verfließen, ehe er den weiten Weg um das Tagesgestirn vollendet hat. Alle 13 Monate 8 Tage gelangt er in Opposition zur Erde und kann, einmal aufgefunden, von Jahr zu Jahr im nächstfolgenden Tierkreisbilde beobachtet werden. Sein Durchmesser beträgt 139000 km, so daß sein Rauminhalt denjenigen der Erde um das 1360fache übertrifft (vgl. Fig. 17). Dafür ist seine Masse gegenüber der Größe relativ gering, denn nur 315 Erdkörper wären nötig, um diesem Riesen das Gleichgewicht zu halten. Dementsprechend ergibt sich die Dichte des Planeten zu 0,23 der Erddichte, d. h. die Verhältnisse im Sonnensystem würden fast ungeändert bleiben, wenn an Stelle des Jupiter ein Wasserball von gleichen Dimensionen seine Bahn um das Zentralgestirn vollzöge. Die vorhin genannte Zahl für den Durchmesser ist lediglich ein Mittelwert, denn schon ein kleines Fernrohr zeigt deutlich die sehr auffällige Abplattung des Planeten. Was bedeuten auch die 43 km Unterschied zwischen dem äquatorialen und polaren Durchmesser der Erde, wenn sich dieselben Größen beim Jupiter um 10000 km unterscheiden!

Wolkengebilde. Die Albedo des Jupiter beträgt 0,62, ist also recht beträchtlich. Schon daraus erkennt man, daß wahrscheinlich wenig von der eigentlichen Oberfläche zu sehen ist, sondern daß wir im wesentlichen das Sonnenlicht von einer stark reflektierenden Wolkenhülle zurückerhalten. Gegenüber dem Planeten Venus, bei dem diese Hülle vollständig detaillos erscheint, erkennt man indessen in der Wolkendecke des Jupiter eine deutlich ausgesprochene Struktur, die sich viel leichter beobachten und auch besser zeichnerisch darstellen läßt als z. B. die matten Schattierungen der Marsoberfläche. Hier haben wir endlich einen Planeten vor Augen, bei dem jede verkehrte Deutung der gröberen Oberflächeneinzelheiten völlig ausgeschlossen erscheint. Schon die ersten Beobachter bemerkten, daß die Jupiterscheibe senkrecht zu der Rotationsachse dunkle und helle Streifen, gewissermaßen helle und dunkle Zonen zeigt. Man bemerkte auch, daß diese Streifen stets eine geradlinige Begrenzung zeigen, woraus sich ohne weiteres ergab, daß die Umdrehungsachse des Jupiter nahe senkrecht auf seiner Bahn stehen müsse. Die Unbequemlichkeiten, die durch die verschiedene Achsenneigung des Mars zur Erde und die damit verknüpfte fortwährende Änderung der Projektion seiner Oberflächenteile auftreten, fallen somit bei Jupiter gänzlich fort, und es lassen sich daher Veränderungen seiner Oberfläche mit viel größerer Sicherheit als solche erkennen. Seit der ersten

Anwendung des Fernrohrs auf Jupiter durch Galilei, Fontana und Zucchi sind die Streifenformen und ihre Änderungen das Hauptbeobachtungsobjekt auf dem Planeten geblieben. Es ist daher notwendig, auf die Hauptergebnisse dieser Beobachtungen kurz einzugehen.

Für gewöhnlich kann man nach einer allgemeinen Orientierung auf der Planetenscheibe eine auffallend helle Äquatorialzone (vgl. Fig. 20) unterscheiden, die nach Norden und nach Süden zu von einem dunklen bräunlichen Streifen begrenzt wird. Es ist wohl nie ernstlich daran gezweifelt worden, daß dieser helle Gürtel des Jupiter an der Stelle der größten Rotationsgeschwindigkeit eine dichte Wolkenzone darstellt, während nördlich und südlich davon der Blick offenbar tiefer in die atmosphärische Hülle des Planeten dringt. Daß es nicht die Oberfläche des Planeten selbst ist, die hier in bräunlicher Färbung durchschimmert, erkennt man sofort daran, daß innerhalb dieser dunklen Bänder noch zahllose Flecke und Streifen sich erkennen lassen, die starken Veränderungen unterliegen. Nur in einigen wenigen Fällen konnte eine längere, ganze Jahre hindurch anhaltende Beständigkeit einzelner Gebilde der Jupiteroberfläche festgestellt werden.

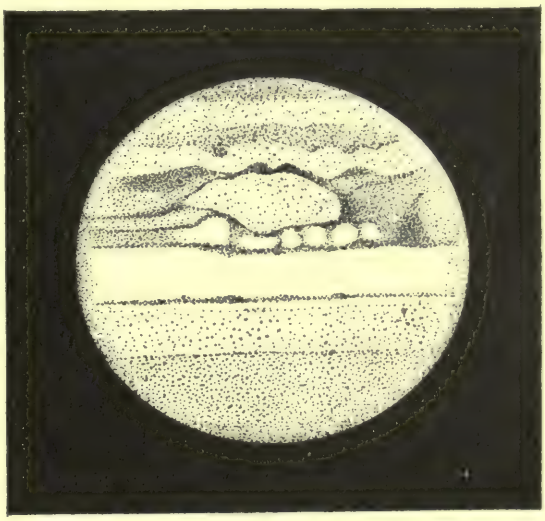


Fig. 20. Jupiter mit dem „roten Fleck" am 27. April 1910.

Unter diesen Umständen erscheint ein besonderer Nachweis einer Atmosphäre bei Jupiter kaum erforderlich, läßt sich aber auf Grund direkter und spektroskopischer Beobachtungen leicht beibringen. Wie es bei dem Vorhandensein einer dichteren Gashülle nicht anders möglich ist, erscheint der Planet am Rande, d. h. dort, wo die Sonnenstrahlen den größten Weg durch die Atmosphäre zurücklegen müssen, wesentlich matter, ja in unmittelbarer Nähe des Randes werden Einzelheiten überhaupt nicht mehr sichtbar. Bei Einstellungen des Planeten am Tage oder in heller Dämmerung ist der Lichtabfall nach dem Rande zu besonders deutlich wahrnehmbar. Es ist dann auch nicht schwer zu erkennen, daß der der Sonne abgekehrte Rand matter ist als der entgegengesetzte — eine Wirkung der Phase, die bei den äußeren Planeten von Jupiter aufwärts kaum noch im Fernrohr bemerkbar ist. Das Spektrum des Jupiter zeigt unzweideutig eine Verstärkung der sog. tellurischen, d. h. der der Erdatmosphäre gehörenden Linien, daneben auch andere, insbesondere ein für alle äußeren Planeten charakteristisches dunkles Band im Rot, etwa mitten zwischen der roten Wasserstoff- und der gelben Natriumlinie. Es geht daraus hervor, daß die Atmosphäre des Jupiter im

wesentlichen der Erdatmosphäre gleicht, daneben aber noch mindestens ein unbekanntes Gas oder eine gasförmige Verbindung enthält, die unsere Lufthülle nicht besitzt.

Veränderliche Achsenumdrehung.

Die in besseren Fernrohren bei guter Luft eine Fülle von Einzelheiten aufweisenden äquatorialen Schattierungen des Jupiter ermöglichten sehr bald eine Feststellung der Rotationszeit des Planeten. Selbstverständlich ist eine solche Umdrehungsbestimmung aus Wolkengebilden bei weitem nicht so sicher wie die gleichartigen Beobachtungen bei Mars, doch wird im vorliegenden Falle die Ungenauigkeit der Beobachtung durch die sehr rasche, etwa 10stündige Umdrehungsperiode wieder ausgeglichen. Vergleicht man nun die auf Grund der sorgfältigsten Schätzungen und Messungen bis jetzt erzielten Ergebnisse untereinander, so erscheinen die Zahlenwerte zunächst absolut unvereinbar, sie ergeben nämlich für Jupiter nicht einen einzigen, sondern eine ganze Reihe von stark abweichenden Rotationswerten, je nach dem Winkelabstande der beobachteten Flecken vom Jupiteräquator. Während sich z. B. für die Zonen nördlich und südlich von etwa 11^0 Planetenbreite eine Umdrehung von rund $9^h\,55^m$ lediglich mit Abweichungen von einigen Sekunden ergab, zeigte das helle und 20^0 breite äquatoriale Gebiet gegen diese Umdrehung ein starkes Vorauseilen, denn die hier sichtbaren Wolkengebilde erreichen schon nach $9^h\,50^m$ die Mitte der Scheibe wieder. Besonders merkwürdig ist es nun, daß die in den obigen Zahlen ausgedrückte Symmetrie in der Rotation der nördlichen und südlichen Halbkugel durch eine von Williams und Denning festgestellte Zone noch rascherer Bewegung gestört wird. Diese Zone liegt zwischen den nördlichen Jupiterbreiten 24^0 und 28^0 und hat eine Rotationszeit von etwas weniger als $9^h\,49^m$. Dieses zonenweise Aneinandergrenzen von Strichen rascher und langsamer Umdrehung, ohne eigentliche Übergänge, stellt eine große Merkwürdigkeit des Jupiter dar. Man hat den Versuch gemacht, die Erscheinung mit den Passat- und Gegenpassatströmungen der äquatorialen Erdgebiete zu vergleichen, unter der Annahme, daß in den rasch bewegten Zonen der Jupiteratmosphäre ein absteigender Luftstrom eine höhere Geschwindigkeit in die tieferen Gebiete mitbringt und daher den hier befindlichen Wolkengebilden ständig vorauseilt. Es bleibt heute tatsächlich kaum eine andere Erklärung für die Rotationsanomalien des Jupiter übrig, nur ist die Ursache der erwähnten Strömungen vielleicht nicht nur in der Wärmestrahlung der Sonne, sondern auch im Planeten selbst zu suchen. Eine gewisse Analogie in bezug auf die veränderliche Rotation zeigt ja auch die Sonne, nur besteht ein wesentlicher Unterschied darin, daß bei der Sonnenphotosphäre die Abnahme der Winkelgeschwindigkeit nach den Polen ziemlich stetig erfolgt, während bei Jupiter sich geradezu Sprünge bemerkbar machen, deren Überbrückung durch Nachweis vermittelnder Zonen bisher noch nicht gelungen ist. Daß ein fester oder auch nur ein flüssiger Planetenkern an einer so verschiedenartigen Rotation mitbeteiligt sein könnte, erscheint von vorneherein ausgeschlossen, und es fehlt daher nicht an Stimmen, die für den ganzen Jupiterball einen gasförmigen Zustand annehmen möch-

ten. Wahrscheinlicher ist es wohl, daß inmitten der gewaltigen Gashülle, die uns im Fernrohr als Begrenzung des Jupiter erscheint, sich bereits ein richtiger Planet mit dunkler, aber noch nicht völlig erstarrter Oberfläche vorfindet, dem jedenfalls unsere Erde in der Entwicklung weit voraus sein dürfte.

Roter Fleck.

Man hat wohl nicht mit Unrecht die gegen Ende der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts erfolgte Erscheinung eines großen rötlichen Flecks auf der Südhalbkugel des Planeten im Sinne einer Unstetigkeit im Erstarrungsprozeß des Jupiter gedeutet. Der „rote Fleck" war jahrelang, selbst noch um die Jahrhundertwende ein sehr deutliches Gebilde und schon wegen seiner Farbe bemerkenswert. Die etwas veränderliche Ausdehnung ließ immerhin im Mittel auf ein Objekt von 30000 km Länge und 15000 km Breite schließen, also auf ein selbst für die Riesenwelt des Jupiter kein alltägliches Störungsgebiet. Schon auf den Zeichnungen von Cassini und Maraldi findet sich in gleicher Lage ein ähnlicher Fleck vor, es ist also durchaus möglich, daß es sich hier um eine periodische Erscheinung handelt. Gegenwärtig beginnt das inzwischen weißlich gewordene Gebilde allmählich zu verblassen, ist jedoch in seinen Umrissen (Fig. 20) noch deutlich erkennbar.

Nach den sonstigen bei der Jupiterrotation gemachten Erfahrungen erscheint es nicht weiter verwunderlich, daß auch der rote Fleck eine veränderliche, und zwar eine unregelmäßig veränderliche Umlaufsbewegung gezeigt hat. Dieselbe schwankte zwischen $9^h\,55^m\,34^s$ und $9^h\,55^m\,42^s$, schloß sich also der langsamen Rotationsbewegung der umliegenden Zone an. Die Beobachtung, daß die ein wenig nördlich, also nach dem Jupiteräquator zu gelegenen Wolkenstreifen den Fleck umschlossen und auch gegenwärtig noch vor ihm gewissermaßen ausweichen, läßt den Gedanken an ein eigentliches Oberflächengebilde des Jupiter nicht aufkommen. Die Beständigkeit der Umrisse und in gewissem Sinne auch der Rotation des Flecks unter Berücksichtigung des geschilderten Verhaltens der benachbarten Wolkengebilde lassen immerhin darauf schließen, daß 1878 an einer Stelle der Planetenoberfläche eine Eruption, etwa ein Gasausbruch od. dgl., stattgefunden hat, bei dem die Dämpfe bis über die höchste Wolkenzone emporgetrieben wurden und für die Dauer der Erscheinung ein ziemlich stationäres Störungsgebiet über dem Eruptionsherd erzeugten. Gerade durch diese Beständigkeit des roten Flecks erscheint die Möglichkeit einer noch völlig gasförmigen oder auch flüssigen Zusammensetzung des Jupiterkerns sehr wenig wahrscheinlich.

Es läßt sich nicht leugnen, daß die Riesenwelt des Jupiter trotz ihrer klaren, deutlichen Details, die sie im Fernrohr dem Beschauer bietet, uns noch eine Fülle von Rätseln aufgibt, so daß sich ein einigermaßen abgeschlossenes Bild von dem Planeten kaum entwerfen läßt. Zweifellos führt uns Jupiter in die Uranfänge geologischer Formationen zurück, in denen vegetabilisches und animalisches Leben auf der Erde noch ausgeschlossen waren. Leider wird uns ein näherer Einblick in diese Entwicklung durch den dichten Schleier, den die Wolkenhülle über den Planeten breitet, unmöglich gemacht.

Saturn. Betrug der Abstand des Jupiter das 5fache der Entfernung der Erde von der Sonne, so müssen wir mit unseren Fernrohren schon den doppelten Raum überbrücken, wenn wir zu Saturn gelangen wollen. Nicht weniger als 1426 Millionen km trennen diese Welt von der Sonne, und $29\frac{1}{2}$ Jahre vergehen, bis wir den matten, schwach rötlichen Wandelstern an derselben Stelle des Tierkreises wiederfinden. Der Äquatorialdurchmesser des Saturn beträgt 118000 km, der polare 106000 km. Trotz der etwas geringeren Größe des Planeten beträgt der Unterschied 12000 km, also noch mehr als bei Jupiter. Saturn ist somit die am stärksten abgeplattete Welt im Planetensystem. Noch durch eine andere Eigenschaft zeichnet er sich unter seinen Geschwistern im Sonnensystem aus, und zwar durch seine außerordentlich geringe Dichte, die den Wert von 0,13 der Erddichte aufweist, somit nur etwa dem spezifischen Gewicht von Alkohol entspricht. Während also das Volumen des Saturn fast 680 Erden fassen würde, kämen ihm an Gewicht bereits 88 Kugeln von der Masse der Erde gleich.

Physische Beschaffenheit und Rotation. Schon daraus sowie aus der hohen Albedo von 0,72, die derjenigen der Venus nahekommt, läßt sich hier mit noch größerer Wahrscheinlichkeit wie bei Jupiter auf einen innerhalb einer undurchdringlichen Gas- und Wolkenhülle ständig verborgenen, vielleicht noch nicht völlig erkalteten Planetenkern schließen. Das Spektroskop gibt von Saturn im wesentlichen eine Kopie des Jupiterspektrums wieder, mit dem einzigen Unterschied, daß eine ganze Reihe von Linien, insbesondere das dunkle Band im roten Spektralgebiet, hier noch kräftiger hervortritt.

Im Fernrohr bilden parallel zum Äquator verlaufende Streifen wieder ein charakteristisches Merkmal der Saturnoberfläche, sie zeigen jedoch auch unter Berücksichtigung der wesentlich ungünstigeren Beobachtungsbedingungen bei weitem nicht die hervorragende Schärfe und Definition der Jupiterwolken. Sie ähneln vielmehr grauen, undeutlich begrenzten Schleiern, die nur ausnahmsweise irgendein schärfer begrenztes Objekt enthalten. Während an den Gebilden der Jupiteroberfläche eine fortlaufende Kontrolle der Umdrehungsbewegung stattfinden kann, ist man bei Saturn in dieser Beziehung auf die seltenen und dabei kurzen Perioden der Sichtbarkeit eines auffälligen Flecks beschränkt. Die wenigen bei solcher Gelegenheit in der Nähe des Saturnäquators angestellten Beobachtungen haben zu einer Umdrehungszeit von rund 10^h14^m mit etwa 1^m Unsicherheit geführt. Dieser Wert war bereits allgemein angenommen, als im Jahre 1903 in etwa 35^0 nördlicher Saturnbreite eine große, weißliche Wolke auftauchte, die erst nach je 10^h38^m die Mitte der Planetenscheibe erreichte.

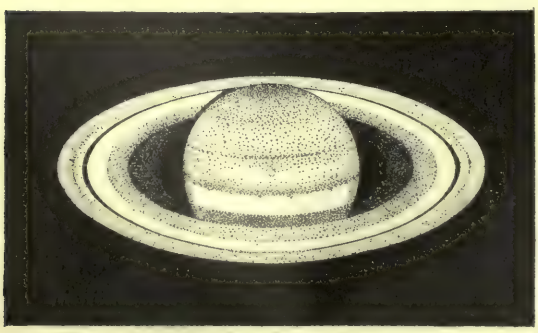


Fig. 21. Saturn bei nahe größter Ringöffnung (1913).

Es ist damit der Nachweis geliefert, daß die sichtbare Saturnoberfläche genau ebenso, wie es bei Jupiter der Fall ist, keine konstante Rotationsdauer hat, sondern zonenweise auftretende Unterschiede zeigt, die mindestens $^1/_{26}$ der ganzen Umdrehung umfassen. Die für diese Abweichungen bei Jupiter gegebene Erklärung gilt also vielleicht bei Saturn in verstärktem Maße. Daß es hier kaum noch allein die Wärmestrahlung der Sonne ist, die diese Passat- und Gegenpassatströmungen mit einer Geschwindigkeit von mehr als 100 m in der Sekunde aneinander vorübereilen läßt, liegt auf der Hand; ähnlich wie bei Jupiter muß also wenigstens ein Teil der Ursache in dem unsichtbaren Planetenkern selbst gesucht werden.

Weniger wegen seiner Oberflächeneinzelheiten als wegen seines eigentümlichen, im Planetenreich einzigartigen Ringschmuckes ist Saturn seit 300 Jahren ein bevorzugtes Objekt astronomischer Fernrohrbeobachtung gewesen. Da dieser Ring jedoch, wie die neuesten Forschungen ergeben haben, nichts anderes als eine Anhäufung von unzähligen kleinsten Körpern, also Trabanten des Planeten ist, so soll er weiter unten zusammen mit den übrigen Satelliten besprochen werden.

Hätte Saturn keinen Ring, so würde man ihm angesichts seiner wenig bemerkenswerten Oberfläche kaum ein besonderes Interesse widmen. Denken wir uns nun diesen ringlosen, von einer undurchdringlichen atmosphärischen Hülle umgebenen Planetenball wesentlich verkleinert und in die doppelte, dann in die dreifache Entfernung des Saturn versetzt, so werden wir eine ungefähre Vorstellung davon erhalten, wie wenig uns die äußersten Schwesterwelten der Erde, Uranus und Neptun, im Fernrohr zu bieten vermögen, und die Schwierigkeiten ermessen, die sich der physischen Untersuchung dieser Planeten entgegenstellen.

Der Uranus ist der erste Wandelstern, durch dessen zufällig erfolgte Entdeckung die Zahl der seit drei Jahrtausenden bekannten fünf Planeten in der Neuzeit vermehrt wurde. Seine Auffindung durch den damals noch im Beginn seiner astronomischen Laufbahn stehenden Wilhelm Herschel am 13. März 1781 bildet wohl ohne Frage eine der wichtigsten Entdeckungen des 18. Jahrhunderts. Wie schwer es damals aber selbst den Gelehrten wurde, die seit alters her eingewurzelte Überzeugung von einer beschränkten Planetenzahl aufzugeben, beweist der Umstand, daß der neue bewegte Stern trotz seiner Helligkeit und scheibenförmigen Begrenzung zunächst für einen von der Sonne ungewöhnlich weit entfernten Kometen gehalten wurde. Erst 5 Monate nach der Entdeckung zeigte Laplace, daß der Weltkörper ein neuer Planet jenseits der Saturnbahn sei. Die daraufhin vorgenommene Untersuchung älterer Meridianbeobachtungen hat dann noch gegen 20 Örter des Planeten zutage gefördert, deren unbewußte Bestimmung z. T. bis auf Flamsteed und das Jahr 1690 zurückreicht. Durch Berücksichtigung dieses wertvollen Materials konnte in verhältnismäßig kurzer Zeit über die Bahn des neuen Wandelsterns völlige Klarheit gewonnen werden. Uranus.

Der Radius dieser Bahn beträgt 2870 Millionen km, die zu ihrer Voll-

endung erforderliche Zeit 84 Jahre 6 Tage. Der Durchmesser der Uranuskugel dürfte etwa 50000 km umfassen, doch ist bei dieser und den folgenden Zahlenangaben zu berücksichtigen, daß Messungen auf einer so winzigen Scheibe, bei der der feinste Meßfaden im Fernrohrokular bereits rund 4000 km verdeckt, außerordentlich schwierig sind. Aus demselben Grunde muß auch die Abplattung, die in verschiedenen Messungsreihen angedeutet ist, als noch nicht endgültig nachgewiesen gelten, obwohl sie wegen der offenkundigen Ähnlichkeit des Uranus mit Jupiter und Saturn sehr wahrscheinlich ist. Die Verwandtschaft mit den vorangehenden beiden Wandelsternen der äußeren Gruppe macht sich insbesondere wieder durch die geringe Dichte des Uranus bemerkbar, die in Erdeinheiten 0,23 beträgt, somit vollständig der Jupiterdichte gleicht. In bezug auf Volumen kommen nach diesen Zahlen dem Planeten etwa 60, in bezug auf die Masse 14 Erdkörper gleich.

Auch in der Albedo des Uranus, die 0,60 beträgt, finden wir eine Wiederholung der für Jupiter gefundenen Ziffer. Fügt man noch hinzu, daß auch die Spektra von Jupiter und Uranus auf eine sehr enge Verwandtschaft der Atmosphären hindeuten, so kann kaum darüber ein Zweifel bestehen, daß uns auch weiter vervollkommnete unter den günstigsten atmosphärischen Bedingungen verwendete Fernrohre nicht viel Neues über die Uranuswelt enthüllen werden.

Versuche, die Umdrehungszeit des Uranus um seine Achse zu ermitteln, sind wiederholt unternommen worden, doch ist erst in neuester Zeit in dieser Beziehung ein positiver Erfolg zu verzeichnen gewesen. Da auch die besten optischen Hilfsmittel bisher keine bestimmteren Einzelheiten auf dem Planeten erkennen ließen, blieb ähnlich wie bei der Venus für die Ermittelung der Rotation lediglich der spektroskopische Weg übrig. Der Einfluß der Phase, insbesondere aber das unsichere Umhertasten nach der Achsenlage, die bei unserem Nachbarplaneten so große Schwierigkeiten bereiten, fallen in gewissem Sinne tatsächlich bei Uranus fort. Die Phase ist auch den genauesten photometrischen Messungen kaum noch zugänglich, und die ungefähre Äquatorlage wird durch die Bahn seiner vier Monde wenigstens genähert angedeutet. Diese Monde haben eine rückläufige Bewegung, und ihre Bahnen stehen nahezu senkrecht auf der Ebene der Uranusbahn. Danach konnte man mit großer Wahrscheinlichkeit darauf schließen, daß die Pole des Planeten in der Richtung senkrecht zu den Satellitenbahnen zu suchen seien. Die sorgfältigen spektrographischen Versuche von Deslandres aus dem Jahre 1901 ließen zunächst nur gemäß der Vermutung auf die Wahrscheinlichkeit einer der abnormen Satellitenbewegung entsprechenden Umdrehung der Uranuskugel von Osten nach Westen schließen. Lowells 10 Jahre später wiederholte Aufnahmen haben dann nach derselben Methode aus den spektralen Linienverschiebungen für die Äquatorgegend eine Rotation von rund $10^{h}\,3/4$ ergeben, so daß auch in bezug auf die rasche, von den inneren Planeten so sehr abweichende Umdrehungszeit die Verwandtschaft mit Jupiter und Saturn unzweideutig hervortritt.

Über die denkwürdige Entdeckung des Neptun auf rein theoretischem Wege im Jahre 1846 ist im vorangehenden Abschnitt ausführlicher berichtet worden. Was die physische Beschaffenheit dieses Planeten anbetrifft, so vermag auf dem nahe sternartigen Scheibchen auch das beste Fernrohr ohne Zuhilfenahme der Photometrie und der Spektralanalyse nichts mehr zu entschleiern. Die kosmische Stellung des, soviel wir heute wissen, äußersten Planeten des Sonnensystems ist durch einen Sonnenabstand von 4500 Millionen km und durch eine Umlaufszeit von 164 Jahren 286 Tagen charakterisiert. Dementsprechend ist auch die scheinbare Ortsänderung des teleskopischen Planeten im Tierkreise ungemein langsam, und 13 Jahre hindurch beherbergt ihn ein jedes der 12 Zodiakalbilder. In seinen räumlichen Dimensionen übertrifft er vielleicht Uranus, ist jedenfalls diesem mindestens gleich. Seine Dichte liegt unterhalb der Uranus- und Jupiterdichte, übersteigt aber mit ihrem Betrage von 0,20 die durchschnittliche Dichte des Saturn noch wesentlich. Während somit im Neptunvolumen wieder mindestens 60 Erden Raum finden würden, kommt seine Masse oder die in Neptun enthaltene Quantität der Materie nur 12 Erden gleich. Neptun.

Von den physischen Ergebnissen, die mit Hilfe der Photometrie und Spektralanalyse bisher erzielt worden sind, erscheint zunächst die Albedo- und Spektrumbestimmung von besonderem Interesse. Die erstere liegt tiefer als bei den vorangehenden Planeten und beträgt nur 0,52, woraus man wohl auf eine das Licht stärker absorbierende Atmosphäre schließen darf. Im Spektrum findet sich das rätselhafte Band der Jupiteratmosphäre wieder, sowie die anderen Bänder, die sich schwächer schon bei Uranus zeigen. Es unterliegt jedenfalls keinem Zweifel, daß zwischen diesen Atmosphären und der Lufthülle der Erde in bezug auf die Zusammensetzung bereits ein beträchtlicher Unterschied besteht. Im Zusammenhange mit der Tatsache, daß wir Uranus sowohl wie Neptun in eine außerordentlich frühe Entwicklungsperiode der Erde zu versetzen gezwungen sind, ist diese Feststellung von besonderem Interesse. Man hat bereits wiederholt die unzweideutig nachgewiesenen Klimaschwankungen der Erde, die mit ihnen Hand in Hand gehenden Formationsänderungen u. a. m. mit Veränderungen in der Zusammensetzung unserer Atmosphäre in Verbindung gebracht, und es hat den Anschein, als ob man tatsächlich einige besonders seltsam und rätselhaft erscheinende Perioden in der Entwicklung des Erdballs, wie die Steinkohlenformation, die Eiszeit usw., tatsächlich auf diesem Wege am einfachsten erklären und verständlich machen könnte. Es ist also durchaus nicht ausgeschlossen, daß in dieser Beziehung die Gashüllen der anderen Planeten auch dem Geologen einmal Anhaltspunkte dafür geben werden, in welcher Richtung diese zunächst noch völlig hypothetischen Atmosphärenänderungen der Erde vor sich gegangen sind.

Durch die kopernikanische Planetentheorie haben die Wandelsterne die ihnen bis dahin zugeschriebene Abhängigkeit von der Erde eingebüßt. Jetzt erlangen sie in anderem Sinne eine große Bedeutung für die Wissenschaft

insofern, als wir aus ihrer Konstitution Winke über die Vergangenheit und Zukunft unseres irdischen Wohnsitzes zu erhalten hoffen dürfen. Damit gewinnen die durch das neue Weltsystem ein wenig gelockerten Beziehungen zwischen der Erde und ihren einstigen Planetentrabanten einen festeren Boden und das mehr oder weniger ähnliche Entwicklungsschicksal eines jeden Wandelsterns schlingt um ihre Gesamtheit noch enger das Band, das sie als Angehörige der Sonnenfamilie schon ohnehin umschließt.

III. Der Erdmond und die Trabanten der übrigen Planeten.

Unter den kosmischen Vergleichsobjekten für bestimmte Entwicklungsphasen der Erde dürfen wir den Erdmond nicht vergessen; ist er doch neben der Sonne der einzige Weltkörper, der schon dem bloßen Auge einen merklichen Durchmesser und dabei deutliche Einzelheiten von Oberflächenschattierungen zeigt. Die wichtige Rolle, die seine Bewegung am Himmel in der Zeitrechnung aller Völker und bei den wichtigsten Fragen der theoretischen Himmelskunde spielt, ist bereits in den ersten Abschnitten behandelt worden, wobei auch die zum Verständnis dieser Bewegung erforderlichen Zahlenwerte mitgeteilt wurden. Wir können uns also hier fast ausschließlich auf die Darlegung der Beziehungen beschränken, die ihn als dunklen erstarrten Weltkörper rein physikalisch mit der Erde verbinden. Von den Daten, die seine kosmische Stellung bestimmen, sollen hier nur die wichtigsten mitgeteilt werden.

Kosmische Verhältnisse des Erdmondes.

Die Entfernung des Mondes von der Erde beträgt in mittlerer Stellung 60,3 Erdhalbmesser oder 384400 km. Gegenüber dem Abstand der uns zunächst gelegenen großen Planeten ist diese Entfernung außerordentlich gering, und tatsächlich gehören nur sehr schwache optische Hilfsmittel dazu, um seine Oberfläche und ihre Einzelheiten genauer beobachten und studieren zu können. Während die für die Zeitrechnung allein maßgebliche synodische Umlaufszeit um die Erde, die mittlere Zwischenzeit zwischen zwei Neumonden, $29^d\ 12^h\ 44^m\ 3^s$ beträgt, braucht der Mond zur Vollendung eines siderischen Umlaufs — bezogen auf eine feste Richtung im Raume — nur $27^d\ 7^h\ 43^m\ 11{,}5^s$, und in genau derselben Zeit vollführt er auch eine vollständige Umdrehung um seine Rotationsachse, die gegen die Normale der Ekliptik nur die Neigung von $1^0\ 32'$ aufweist. Infolge der Übereinstimmung zwischen der Revolutions- und Rotationszeit zeigt uns das Antlitz des Mondes stets die gleichen Umrisse und lediglich die elliptische Bewegung um die Erde sowie die wechselnde Stellung des Beobachters auf der Erdoberfläche bedingen geringe, dem bloßen Auge für gewöhnlich entgehende Verschiebungen der sichtbaren Hälfte, die man als scheinbare Libration des Mondes zu bezeichnen pflegt. Dieser Libration haben wir es zu verdanken, daß man im Laufe der Zeit nicht nur die Hälfte, sondern im ganzen 0,59 der Mondoberfläche übersehen kann. Der scheinbare Durchmesser der Mondscheibe am Himmel wechselt mit der Entfernung des Mondes vom Beobachter und beträgt im Mittel etwas mehr als, 31′; sein wahrer Durchmesser ist 3480 km und entspricht also etwa der direk-

ten Entfernung von Hamburg bis zur Südspitze von Grönland. Das Volumen unseres Trabanten kommt genau $^1/_{50}$ des Erdvolumens gleich, während die Masse nahe $^1/_{80}$ der Erde beträgt. Demnach ist die Monddichte nur 0,6 der durchschnittlichen Dichte der Erde; sie entspricht dem spezifischen Gewicht 3,4 der irdischen Körper, somit etwa der Dichte unserer schwereren Gesteine.

Es gehört keine besonders lebhafte Phantasie dazu, um dem Erdtrabanten eine feste Oberfläche zuzuschreiben, und tatsächlich finden wir bereits im Altertum neben ganz unmöglichen Vorstellungen auch einzelne durchaus richtige Anschauungen über die physische Konstitution der Mondoberfläche. Daß darunter auch zuweilen die Vorstellung von hohen Bergen auftaucht, erscheint nicht weiter verwunderlich. Sind auch die Abweichungen der Lichtgrenze von einer Kreisprojektion für das bloße Auge sehr unbedeutend, so können sie doch bei einiger Aufmerksamkeit in bestimmten Phasen erkannt werden. Immerhin erscheint ohne Mitwirkung des Fernrohres irgendeine wissenschaftliche Beobachtung der Mondoberfläche ausgeschlossen, und man kann sich daher die Überraschung vorstellen, die Galilei erlebte, als er sein erstes primitives Fernglas auf den Mond richtete. Genoß er doch als erster unter den Menschen das Glück eines Einblicks in die physischen Verhältnisse eines anderen Weltkörpers, der trotz mancher Verschiedenheiten durch seine Berge und Täler doch lebhaft an unseren irdischen Wohnsitz erinnerte! Die rohen Skizzen einzelner Mondphasen, die der Entdecker der Fallgesetze seinem im Jahre 1610 erschienenen „Sternenboten“ einverleibte, werden auch trotz ihrer geringen wissenschaftlichen Bedeutung stets ein historisches Denkmal menschlicher Kulturentwicklung bleiben.

Entwicklung der Mondkartographie.

Für eine ersprießliche topographische Untersuchung des Mondes mit Hilfe des neu erfundenen Instruments fehlte allerdings zunächst die kartographische Unterlage. Trotz der einfachen, durch die dauernde Sichtbarkeit derselben Mondhälfte gegebenen Verhältnisse scheitern doch zunächst alle Versuche einer zeichnerischen Darstellung an der Reichhaltigkeit der Mondformationen. Die Jesuiten Christoph Scheiner, Langrenus und Grimaldi, durchweg tüchtige Beobachter, von denen besonders der erste als Sonnenforscher sich hervorgetan hat, bringen nur rohe Übersichtsskizzen der Mondoberfläche zustande, von anderen weniger bekannten Namen ganz zu schweigen. Als eine wirkliche Mondkarte kann erst die 1647 erschienene Tafelsammlung der Selenographie von Hevelius gelten. Wie alles andere, das uns der Danziger Astronom hinterlassen hat, kennzeichnet das Werk, das eine Karte und 40 Phasenzeichnungen enthält, einen hervorragenden Beobachter und Künstler. Selbst die Resultate, die später Riccioli, Cassini, Lahire u. a. auf dieser Grundlage in mühsamer Arbeit erzielten, können dem von Hevelius hinterlassenen Bild der Mondoberfläche bei weitem nicht gleichgesetzt werden, geschweige denn als ein Fortschritt gelten. Selbstverständlich sind alle diese ersten kartographischen Versuche durch einfache Schätzungen der Lage der Mondformationen gegen die Ränder entstanden. Ein technisch

immer noch unvollkommenes aber dafür auf mikrometrischen Messungen beruhendes Kartenbild der Mondoberfläche, das bereits für eine mittlere, von der Libration nicht beeinflußte Lage des Mondes zur Erde gilt, entwarf erst Tobias Mayer in Göttingen um das Jahr 1770. Dieser Karte gegenüber muß man selbst die umfangreicheren, etwa 20 Jahre später angestellten Studien Schröters mit ihrer Betonung rein äußerer Momente eher als einen Rückschritt denn als Fortschritt in der Selenographie bezeichnen. Rasch hintereinander liefert dann das 19. Jahrhundert drei hervorragende Musterleistungen der Mondkartographie in vollendeter Ausführung. Die durch den frühen Tod ihres Verfertigers, des Landmessers Lohrmann, leider unvollendet gebliebene, technisch wohl am höchsten stehende Karte begann 1824 zu erscheinen. Im Jahre 1836 liegt die nach ähnlichem Plane gezeichnete Mappa Selenographica von Beer und Mädler fertig vor, die für die Mondforschung fast dieselbe Bedeutung hat wie die Sternkarten der sog. Bonner Durchmusterung für die Fixsternastronomie. Die 1870 erschienene Mondkarte von Schmidt ist schließlich ohne Frage das vollständigste und genaueste Kartenwerk der Mondoberfläche, das wir besitzen. Wenn ihm nicht die gebührende Beachtung zuteil geworden ist, die es verdient, so lag es daran, daß es in einem Moment erschien, in dem bereits die photographische Platte der zeichnerischen Monddarstellung erfolgreich Konkurrenz zu bereiten begann. Heutzutage hat die photographische Aufnahme die Karten vollständig aus dem Felde geschlagen, und eine ganze Reihe von photographischen Mondatlanten, unter denen der große Pariser Mondatlas an erster Stelle zu nennen ist, ermöglichen jedem Beobachter einen direkten Vergleich mit den beobachteten Einzelheiten. Trotz ihrer großen Treue und der z. T. hervorragenden Technik der Reproduktion haben die photographischen Mondbilder den Wunsch nach einer guten Karte nicht verstummen lassen. Bei stärkerer Vergrößerung tritt auch bei den schärfsten Aufnahmen das Korn der Platte sehr störend hervor, so daß bei guten Luftverhältnissen schon mittlere Instrumente dem Auge einen weit tieferen Einblick in die Einzelheiten der Mondoberfläche vermitteln als die beste Photographie. Auch für rein statistische Arbeiten ist eine Darstellung der Struktur unseres Trabanten in den konventionellen Zeichen der Erdkarten unentbehrlich, so daß der Photographie trotz ihrer unbestrittenen Erfolge das selenographische Arbeitsfeld vorläufig noch nicht ausschließlich eingeräumt werden kann.

Fehlen von Wasser und Luft.

Es darf wohl als bekannt vorausgesetzt werden, daß die von Galilei und Kepler vermutete, von Hevelius bereits angezweifelte Teilung der Mondoberfläche in Land- und Wassergebiete der genaueren wissenschaftlichen Untersuchung nicht standgehalten hat. Obwohl die alte, auf Riccioli († 1671) zurückgehende Nomenklatur, die in den hellen Gebieten des Mondes durchaus richtig Berge, in den dunkleren dagegen ohne jede Berechtigung Meere erblickte, auch heute noch beibehalten ist, so kann es doch keinem Zweifel mehr unterliegen, daß Wasser und der Träger jeder Feuchtigkeit, die Atmosphäre, auf dem Monde vollkommen unbekannte Begriffe sind. In Wirklich-

keit erweisen sich die „Meere“ und „Ozeane“, die für den naiven Beobachter aller Zeiten zu den rohen Umrissen eines menschlichen Antlitzes zusammenschmolzen, im Fernrohr als weite, von Gebirgen scharf begrenzte Ebenen mit zahllosen Höhenunterschieden und mannigfachen unveränderlichen Einzelheiten der Schattierung. Trotz der genauesten Beobachtungen ist auf der Mondoberfläche noch kein Fleckchen gefunden worden, das man auch nur entfernt mit einem See oder auch nur mit einem flachen Wassertümpel der Erde vergleichen könnte, und noch nie ist die Wahrnehmung irgendwelcher Einzelheiten durch Nebel oder Wolkenbildung über der Mondoberfläche vereitelt worden. Schwarz und ohne jeden Halbschatten verläuft die Lichtgrenze, unheimlich scharf bilden sich in dem grellen Sonnenlicht die Umrisse der Bergschatten auf dem Mondboden ab; die Sterne, die der Erdtrabant bei seinem Umlauf zuweilen bedeckt, verschwinden ohne jede Brechung und Lichtabnahme an seinem scharfen Rande, kurz, es genügt ein Blick durch ein gutes Fernrohr, um zu erkennen, daß uns die Natur gerade hier, wo wir einen tieferen Einblick in die Lebensbedingungen eines anderen Weltkörpers zu erhalten hofften, ein Gestirn vorführt, das vom Standpunkte irdischer Entwicklungsgeschichte seine Rolle längst ausgespielt hat und einer bedeutenderen Veränderung sicher kaum noch fähig ist.

Das Fehlen einer Atmosphäre auf dem Monde läßt sich auch durch theoretische Erwägungen begründen. Nach den von Clausius um 1890 aufgestellten und begründeten Gesetzen der sog. kinetischen Gastheorie kann man aus dem spezifischen Gewicht und der Temperatur eines Gases die mittlere Geschwindigkeit seiner in fortwährender Bewegung befindlichen Moleküle ableiten. Andererseits ist aus der Massenanziehung eines Weltkörpers die Anfangsgeschwindigkeit leicht zu ermitteln, die man einem Körper erteilen müßte, um ihn der Anziehungssphäre des betreffenden Gestirns zu entrücken. Derartige Zahlenzusammenstellungen für die verschiedenen Gase haben nun ergeben, daß die Erde z. B. Wasserstoff und Helium nur in sehr beschränktem Maße festzuhalten vermag. Beim Monde, der eine wesentlich geringere Anziehungskraft ausübt als die Erde, spielen die merklich schwereren Bestandteile unserer Atmosphäre, Sauerstoff und Stickstoff, etwa dieselbe Rolle hinsichtlich des dauernden Bestandes wie für uns der Wasserstoff oder das Helium, d. h. die Geschwindigkeit der molekularen Bewegung der meisten Gase wird dort durch die Anziehung so wenig kompensiert, daß eine Atmosphäre, auch wenn sie einmal auf dem Monde vorhanden war, in kurzer Zeit in den Weltraum diffundiert sein muß.

Nach dieser Auffassung hätte man auch eine Erklärung dafür, weshalb auf dem kleinen Merkur alle Anzeichen einer Lufthülle fehlen und der zweitkleinste Weltkörper der Planetenreihe, Mars, gegenwärtig bereits mit einer sehr dünnen Atmosphäre haushalten muß, während die großen äußeren Planeten mächtige Gashüllen besitzen. Entspricht die Theorie vollständig den wirklichen Verhältnissen, so ließe sich damit behaupten, daß nicht nur unser Begleiter — und mit ihm auch alle anderen Wandelstern-

trabanten — sondern sicherlich auch die kleinen Planeten zwischen Mars und Jupiter keine Atmosphäre besitzen und daher nach dem Abschluß ihres Erstarrungsprozesses für die Entwicklung höherer Lebensorganismen kaum in Frage gekommen sind.

Orographische Verhältnisse.

Sieht man sich den Mond im Fernrohr etwas genauer an, so fällt sehr bald der große Unterschied zwischen der irdischen und lunaren Oberflächenbildung auf. Nur wenige Gebirgszüge der Mondoberfläche, wie die Apenninen, Alpen oder der Kaukasus, haben mit Kettengebirgen der Erde entfernte Ähnlichkeit, alles andere ist ein einziges gewaltiges Kratermeer, das durch eine unregelmäßige Zone dunkler getönter Tiefebenen unterbrochen wird. Um eine Vorstellung von der Zahl der Krater zu geben, genügt es, darauf hinzuweisen, daß man bereits in einem mittleren Instrument gegen 40000 dieser Gebilde von 500 m bis zu 200 oder 300 km Durchmesser zählen kann, eine Ziffer, die die Schar der mit bloßem Auge sichtbaren Sterne der Himmelskugel fast um das Zehnfache übertrifft. Die Krater, über deren Aussehen und Eigentümlichkeiten heutzutage auch dem Laien eine jede gute Photographie Auskunft erteilt, beherrschen so sehr das ganze Bild der Mondoberfläche, daß wir in erster Linie diesen Bildungen gerecht werden müssen, wenn wir einen Einblick in die geologische oder richtiger in die selenologische Vergangenheit des Mondes gewinnen wollen. In dieser Frage käme allerdings mit wesentlich größerem Rechte der Geologe als der Astronom zu Worte.

Die in ihren Dimensionen so außerordentlich verschiedenen Krater der Mondoberfläche haben gewisse gemeinsame Eigenschaften, von denen der meist unter dem äußeren Niveau gelegene Boden, ein geringer äußerer und sehr beträchtlicher innerer Böschungswinkel sowie das häufige Vorkommen von Zentralbergen an erster Stelle zu nennen wären. Bei den kleinen Kratern von wenigen Kilometern bis zu etwa 300 m Durchmesser, die uns bei guter Luft die Fernrohre eben noch zeigen, sind Einzelheiten des Aufbaues wesentlich schwieriger zu gewinnen, doch wäre es zweifellos absurd, ihnen eine wesentlich andere Entstehungsursache zuzuschreiben wie den größeren Ringgebirgen. Der einzige Unterschied, der abgesehen von den Größenverhältnissen hier hervortritt, liegt lediglich in der zeitlichen Entwicklung dieser Gebilde, insofern, als die größten Ringgebirge wahrscheinlich einer älteren, die kleinen Krater dagegen einer jüngeren Periode des Entwicklungsganges der Mondoberfläche angehören.

Der naheliegende Satz, daß gleiche Formen auch durch gleiche Kräfte entstehen, läßt sich nicht ohne wesentliche Einschränkungen von der Erde auf den Mond übertragen. Der Vulkanismus der Erde hat selbst in der Zeit seiner höchsten Entwicklung bei der Gebirgsbildung nur eine recht untergeordnete Rolle gespielt. Die Krater, die er geschaffen hat, sind fast ohne Ausnahme keine Erhebungs-, sondern Aufschüttungsgebilde, erzeugt durch die Auswurfsprodukte eines vulkanischen Durchbruchskanals durch die auf dem Urgestein ruhenden Sedimente. Schon nach der Verteilung der irdischen Vulkane auf Bruchspalten der Erdkruste darf man sie gewisser-

maßen als eine letzte äußere Erscheinungsform der glutflüssigen Herde des Erdinnern ansehen. Ganz anders auf dem Monde. Die Verteilung, die Nebeneinanderlagerung, das Ineinandergreifen der Kreiswälle, ihre z. T. riesige Öffnung gegenüber der Wallhöhe (Fig. 22) u. a. m. schließt ihre Entstehung aus herausgeschleuderten Aschen, Sanden und Gesteinstrümmern vollkommen aus. Es unterliegt keinem Zweifel: für das gewaltige Schlackenfeld unseres Trabanten kann der rein schematische Vergleich mit irdischen Vulkanen keine Erklärung bringen, ohne daß man imstande wäre, die Analogie vollständig zu entbehren.

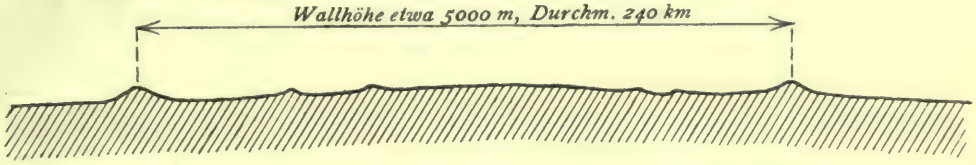


Fig. 22. Profil der Wallebene Clavius auf dem Monde im richtigen Längen- und Höhenverhältnis.

Mutmaßliche Entstehung der Krater

Eine Anschauung, die die Entstehung der Mondgebilde auf den Einsturz gewaltiger, durch keine Atmosphäre gehemmter Meteore zurückführen wollte, hat heute unter den Selenologen nur noch sehr wenige Anhänger, man muß also schon wohl oder übel bei den inneren Kräften bleiben. Tatsächlich läßt sich auch aus der Fülle aller im Laufe der Zeit geäußerten Ansichten über die Entstehung der Mondformationen ein Bild zusammenfügen, das vielleicht auch in dieser Form den wirklichen Verhältnissen nicht vollständig entspricht, aber den Vorzug hat, daß es ohne besondere Hypothesen auf geologisch bekannte Erscheinungen zurückgeht.

Da die Wälle aller Mondkrater nahe kreisförmig sind und von der Oberfläche des Planeten senkrecht emporsteigen, so kann tatsächlich kaum ein Zweifel darüber bestehen, daß der Sitz der Kräfte, die die Ringgebirge erzeugten, im Inneren unseres Trabanten zu suchen ist. Weiterhin kann als sicher angenommen werden, daß die Kraterbildung auf unserer Nachbarwelt einsetzte, als diese erst eine dünne elastische Kruste besaß, im Gegensatz zur Erde, wo erst in einem stark vorgeschrittenen Alter des Planeten die Gase und das Magma des Inneren sich durch das Urgestein und die Sedimente einen Weg an die Oberfläche zu bahnen suchten. Trotz der bereits hervorgehobenen Unterschiede zwischen den Erd- und Mondkratern ist das Anfangsstadium der vulkanischen Tätigkeit auf beiden Planeten vielleicht doch nicht unähnlich gewesen. Man braucht nur an den jedem Geologen bekannten terrestrischen Vorgang der Lakkolithbildung in Verbindung mit den Einsturzerscheinungen der sog. Rückzugskalderen zu erinnern, um etwa zu der folgenden Vorstellung von der Entstehung der wichtigsten Mondformationen zu gelangen.

Auf dem erkaltenden Weltkörper bildet sich eine festere Kruste. In einem bestimmten Stadium der weiteren Entwicklung bahnen sich Gase und Laven durch Tausende von größeren und kleineren Kanälen den Weg an die Oberfläche und wölben, meist ohne einen eigentlichen Durchbruch zu

erzielen, den Boden blasenartig auf (Lakkolithe). Ein Hin- und Herpulsieren der magmatischen Materie zwischen der Pyrosphäre und den Ausflußkanälen verursacht den Einsturz der meisten kuppenförmigen Aufwölbungen (Rückzugskalderen) und erzeugt den Grundstock der heutigen uns sehr merkwürdig anmutenden Mondringgebirge. Der Boden der Krateröffnungen wird späterhin vom empordringenden Magma noch wiederholt überschwemmt; hier und da quillt die Lava aus dem zentralen Herde oder aus peripherischen Ausbruchsstellen empor und erzeugt unter starker Entgasung die Zentral-

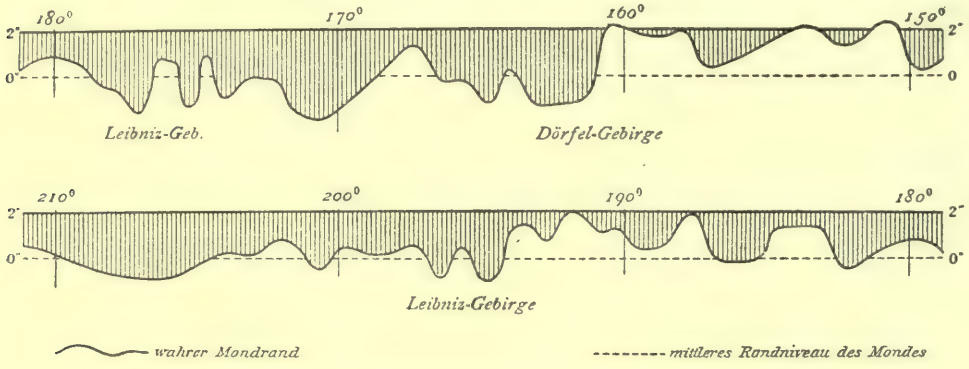


Fig. 23. Profilumriß des Mondrandes in der Nähe des Mondsüdpols (10fach überhöht).

berge und die zahlreichen parasitischen Krateröffnungen, von denen die Gebirgsgegenden der Mondoberfläche wie übersät erscheinen. Der beträchtliche Glanz einiger dieser hochgelegenen kleinen Krater ließe sich durchaus im Sinne der terrestrischen Fumarolen- und Solfatarenbildung durch Ausströmungen von sauren Dämpfen oder auch durch Auswürfe von weißer Asche erklären.

Entstehung der Mareebenen.

Die von hohen, eigentümlich zerrissenen Gebirgen umgebenen Mareflächen des Mondes lassen sich unter Zugrundelegung der oben angenommenen starken Umwälzungen bei der Erstarrung unseres Trabanten am einfachsten als Aufschmelzungsherde der Mondrinde auffassen. Ein Teil der Oberfläche des erstarrenden Weltkörpers wird wieder flüssig und bildet einen riesigen Lavasee, der einen Teil der ursprünglichen Ringwallandschaft vernichtet und an seinen Ufern hier und da ausgesprochene Kraterruinen übrig läßt. Nach und nach bilden sich an den Rändern dieser magmatischen Gebiete wieder feste Schollen, die moränenartig beiseite gedrängt werden und hier die wenigen echten Gebirgszüge erzeugen, die wir heute noch auf dem Monde erblicken. Nach dem Erkalten ist indessen die Marefläche keine vollkommene Ebene geblieben. Deutlich gewahren wir Anzeichen mehrfacher Überflutungen durch dunkle Massen der nicht mehr feststellbaren peripherischen Eruptionsherde. Die weitere Erstarrung und Abkühlung des Mondkörpers verursacht schließlich in den Ebenen, diesen jüngsten Bildungen seiner Lithosphäre, starke Senkungen, die an dem Profil des äußersten Mondrandes sich besonders gut studieren lassen.

Die Strahlensysteme.

Einige Schwierigkeiten bereitet die Erklärung der merkwürdigen hellen Streifen, die um die Vollmondszeit meridianartig von einigen Kratern, ins-

besondere von dem Ringgebirge Tycho ausstrahlen und, ohne die geringste Niveaustörung zu verursachen, sich über Berg und Tal bis auf Entfernungen von 1800 km Länge erstrecken. Bei niedrigem Sonnenstande, also z. B. um die Zeit der Viertelphasen, sind sie kaum erkennbar und verschwinden an der Lichtgrenze vollständig. Diese Streifen gewähren den Eindruck, als wenn eine in ihrer Richtung wechselnde, von den betreffenden Kratern ausgehende Luftströmung feine weiße Asche über den Boden der Mondoberfläche gestreut hätte. Die Struktur der Streifen erinnert, ins Kleine übertragen, lebhaft an die Figuren, die ein leichter Wind hervorzaubert, wenn er Schnee oder die Quarzkörnchen feinen Dünensandes vor sich herjagt. Obwohl die Vermutung eines „äolischen" Ursprungs der Strahlensysteme nicht alle Eigentümlichkeiten, insbesondere nicht die an ihnen betrachtete Regelmäßigkeit und speziell im Fall des Tycho nicht den dunkleren Ring zu erklären vermag, der den Ursprungskrater umgibt, läßt sich heute noch keine andere plausiblere Deutung für diese seltsamen Gebilde aussprechen. Die sonst naheliegende und noch heute häufig vertretene Anschauung, daß diese rätselhaften Streifen als ausgefüllte, von den Explosionszentren ausgehende Sprünge der Mondkruste aufzufassen seien, widerspricht zu sehr der direkten Anschauung und wird von keinem aufmerksamen Beobachter geteilt werden.

Die Rillen.

Wo sich auf dem Monde tatsächlich Spalten und Risse gebildet haben, sind sie auch heute noch in Gestalt der sog. Rillen deutlich als solche zu erkennen. Diese Furchen, die Krater und Ebenen durchsetzen, zeigen durchaus den Charakter von äußerlichen Sprüngen der Mondrinde. An der Grenze der Mareebenen erscheinen sie am häufigsten und zeigen oft einen zur benachbarten Uferlinie konzentrischen Verlauf. Diese höchstens 1 bis 2 km breiten Spalte sind wahrscheinlich bei der Senkung der Mareebenen entstanden, wobei vielleicht der gewaltige Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht eine nicht unwesentliche Hilfsrolle gespielt hat. Folgt doch auf unserem Trabanten der intensiven, durch keine Lufthülle gemilderten Tagesstrahlung von 14 Tagen eine ebenso lange Nacht, in deren Verlauf einzelne Teile der Mondoberfläche bis auf die Temperatur des Weltraumes sich abkühlen mögen!

Da die gegenwärtigen kosmischen Verhältnisse dem Monde sicher bereits seit vielen Jahrtausenden, wenn nicht gar seit Jahrmillionen eigentümlich sind, ist auf dieser Welt ohne Wetter und Jahreszeit kaum die Wahrnehmung einer größeren Veränderung zu erhoffen. Die wild zerklüfteten Gipfel und Hänge der Krater, die nach Beobachtungen der Schattenlängen oder nach direkten Messungen im Randprofil oft aus Depressionen von über 4000 m Tiefe bis zu Höhen von gleicher Größenordnung emporsteigen, zeigen so viele Einzelheiten, daß selbst ein gewaltiger Bergsturz nur einmal ganz zufällig, etwa bei stereoskopischer Vergleichung von zwei photographischen Mondaufnahmen, zu entdecken wäre. Die Feststellungen von Neubildungen oder von Anzeichen einer Fumarolentätigkeit innerhalb der Krater, die

früher wiederholt bekannt gegeben wurden, sind auch größtenteils verstummt, seitdem die Photographie uns unparteiische Natururkunden des Mondantlitzes verschafft und den Beweis seiner wenigstens in den gröberen Zügen unveränderlichen Beschaffenheit erbracht hat.

Mineralogische Untersuchungen.

Das hier skizzierte Ergebnis der selenographischen Forschung wäre unvollständig, wollte man nicht wenigstens beiläufig auch den Versuchen einige Worte widmen, die darauf hinausgehen, Anhaltspunkte für die Zusammensetzung der mineralischen Stoffe der Mondoberfläche zu gewinnen.

Zunächst ist hervorzuheben, daß die Vergleichsobjekte, wie man vielleicht glauben möchte, durchaus nicht unter den hellen Gesteinen der Erde zu suchen sind. Der Mond ist im Gegenteil ein relativ sehr dunkler Körper. Seine Albedo beträgt 0,13, d. h. seine Oberfläche reflektiert im Mittel nur 13% der auffallenden Sonnenstrahlen. Das entspricht unter irdischen Gesteinen vulkanischer Herkunft etwa der Albedo von Trachyt und Basalt, während unter den Graniten der Quarzporphyr als Vergleichsobjekt an erster Stelle zu nennen wäre. Der Polarisationswinkel der Gesteine der Mondoberfläche deutet allerdings in erster Linie auf die Verwandtschaft mit vulkanischen Gebilden hin. Die mittlere Monddichte (3,4 im Vergleich mit Wasser) läßt an seiner Oberfläche leichte poröse Gesteine, vielleicht von bimssteinartiger Struktur vermuten, so daß alle bisherigen Beobachtungen, so verschiedenartig ihr Ausgangspunkt auch sein mag, sich immer mehr zu einem geschlossenen, wenngleich kosmogonisch wenig interessanten Bilde zusammenschließen: der Mond ist, darüber kann kaum ein Zweifel bestehen, zu einem Schlackenfeld erstarrt, ohne je den Schauplatz einer höher organisierten animalischen Entwicklung gebildet zu haben.

Die Trabanten der anderen Planeten.

Durch die großen Dimensionen ihres Trabanten steht die Erde in der Reihe der inneren Planeten völlig vereinzelt da. In der Umgebung des Merkur und der Venus hat man nach der Entdeckung des Fernrohrs und auch später bei jeder bedeutenderen Vervollkommnung seiner optischen Bestandteile vergebens nach einem Begleiter gesucht, und bei Mars hat erst das Jahr 1877 die Entdeckung von zwei winzigen Satelliten gebracht, die sich in ihren Dimensionen auch nicht entfernt mit unserem Monde messen können. Erst die Riesenwelten, die in der fünffachen Erdentfernung von der Sonne beginnen, sind gleichzeitig auch Mittelpunkte von recht bedeutenden Trabantenfamilien. So finden wir mit Jupiter 4 große und 5 kleine, mit Saturn neben dem Ringsystem 8 große und 2 kleine Satelliten kosmisch verbunden. Um Uranus bewegen sich 4, um Neptun 1 großer Mond, doch würde die Entdeckung von weiteren kleinen Satelliten hier keinerlei Überraschungen bringen. In der Verteilung der Begleiter auf die einzelnen Planeten herrscht jedenfalls eine eigenartige Willkür, für die uns vorläufig eine Erklärung fehlt. Tatsächlich ist es bisher keiner Theorie gelungen, auch nur eine Andeutung für die Ursache der Kräfte zu finden, die den einen Planeten mit einer ganzen Schar oder gar wie bei Saturn mit einem Ring von Trabanten, einen anderen

benachbarten dagegen mit wenigen oder nur mit einem Satelliten ausgestattet hat.

Alle Planetentrabanten erscheinen von der Erde, wie kaum besonders betont zu werden braucht, unter einem so kleinen Winkel, daß jede sichere Wahrnehmung von Einzelheiten ausgeschlossen erscheint. Nur einzelne Jupitermonde, die in ihren Dimensionen den Planeten Merkur z. T. an Größe wesentlich übertreffen, scheinen eine deutlichere Oberflächenstruktur zu besitzen, obwohl sich auch hier, wie nicht anders zu erwarten ist, die einzelnen Wahrnehmungen mehrfach widersprechen. Es bleiben somit für die Behandlung der Stellung der Trabanten im Planetensystem lediglich ihre kosmischen Verhältnisse übrig, deren möglichst zusammenhängende Darlegung den Inhalt der nächsten Zeilen bilden soll.

Die geregelten Bewegungsverhältnisse des Sonnensystems finden sich ganz entsprechend auch in seiner Trabantenwelt verkörpert. Hier wie dort erfolgen die Revolutionen nach dem Massen- und Entfernungsgesetz der Newtonschen Gravitation. Der besondere Fall einer fast kreisförmigen Bahnellipse, der nahe übereinstimmenden Neigungen usw. wird auch bei den größeren Trabanten angetroffen, während die in den letzten Jahrzehnten entdeckten kleinen Satelliten, wahrscheinlich auch die einzelnen Teilgebilde des Saturnringes, ähnlich wie die Asteroiden im Planetensystem auch bezüglich ihrer Bahnen eine Sonderstellung einnehmen.

Massenbestimmung der Planeten aus der Trabantenbewegung.

In einer gewissen Hinsicht lassen freilich auch die Trabantenbewegungen einen Rückschluß auf die physische Beschaffenheit der Körper, mit denen sie verbunden sind, zu. Genau ebenso, wie die Bewegungen der Planeten Zahlenwerte für das Gewicht oder die Masse der in der Sonne verkörperten Materie liefern, ebenso gestatten auch die Trabantenbewegungen einen sicheren Rückschluß auf die Masse der von ihnen umkreisten Planeten. Damit erhält man auch für die physische Beschaffenheit derselben Anhaltspunkte, ohne die unsere Vorstellung von diesen Welten eine empfindliche Lücke aufweisen würde. Der in dem dritten Keplerschen Gesetze ausgesprochene mathematische Zusammenhang zwischen den Massen, Abständen und Umlaufszeiten wurde bereits auf Seite 231 mitgeteilt, auch wurde dort als Beispiel die Berechnung der Massen der Erde und des Jupiter ausgeführt.

Die Marstrabanten.

Unter den Trabanten der inneren Planeten verdienen die Monde des Mars trotz ihrer Kleinheit wegen der eigenartigen Stellung, die sie zum Hauptplaneten einnehmen, ein besonderes Interesse. Mehr als $2\frac{1}{2}$ Jahrhunderte ist der rote, alle zwei Jahre in besonders hellem Glanze am Sternenhimmel leuchtende Planet mit Fernrohren jeder Größe beobachtet worden, ohne daß man die Existenz seiner Monde auch nur geahnt hätte. Einem der älteren optischen Meisterwerke des Amerikaners Clark, dem durch die Entdeckung des Siriusbegleiters bekannt gewordenen Refraktor der Sternwarte in Washington, und dem geübten Auge von Asaph Hall war es vorbehalten, unsere Kenntnisse in dieser Beziehung zu erweitern. Die von Hall im August 1877 entdeck-

ten Marstrabanten Phobos und Deimos bilden wegen ihrer Lichtschwäche und ihres geringen Abstandes vom Planeten außerordentlich schwierige Beobachtungsobjekte. Ihre Größe läßt sich lediglich aus der Helligkeit schätzen, und die darauf beruhende Annahme von 10 km für ihren Durchmesser dürfte noch eher zu hoch als zu tief gegriffen sein. 9200 bzw. 23000 km oder 2,7 bzw. 6,7 Marshalbmesser trennen Phobos und Deimos von der Marsmitte, und dieser geringen, noch leicht vorstellbaren Entfernung entsprechend ist auch ihre Bewegung um den Planeten außerordentlich rasch. Sie erfolgt in $7^h\,39^m$ bzw. in $1^d\,6^h\,18^m$, so daß der innere Mond der Rotationsbewegung des Planeten um den dreifachen Betrag vorauseilt. Für einen Marsbeobachter taucht somit dieser Mond als ein heller Stern nicht mit den anderen Gestirnen am östlichen, sondern am westlichen Horizonte auf, um in raschem Laufe die Sphäre ostwärts zu überschreiten. Bei dem zweiten Monde kommt dagegen die Bewegung der Umdrehungszeit des Planeten so nahe, daß er der normalen Bewegung der Sphäre von Osten nach Westen nur langsam folgt; in etwa fünf Marstagen geht Deimos nur einmal auf und unter, während Phobos an jedem Marstage dreimal auf- und untergeht. Unter dem Einfluß dieser Monde muß die Zeitrechnung etwaiger Marsbewohner eine von unserer irdischen ganz abweichende Form angenommen haben, und die Schwierigkeiten unserer Längenbestimmungen aus Mondbeobachtungen würden bei der 90mal rascheren Bewegung des innersten Marstrabanten vollständig wegfallen. Da man nach den Ergebnissen der letzten Jahrzehnte auch bei dem innersten Saturnring und bei einigen spektroskopischen Doppelsternen außerordentlich kurzen Umlaufszeiten begegnet, so kann die geringe Distanz des Phobos als ein besonderer Ausnahmefall im Kosmos nicht mehr gelten.

Die vier alten Jupitermonde.

Der starke Sprung in den Dimensionen, der sich unter den Planeten zwischen Mars und Jupiter bemerkbar macht, ist auch in ihren Trabantenwelten vorhanden, insofern, als hier auch die winzigsten und die größten Satelliten des Sonnensystems einander gegenüberstehen. Schon als Galilei am 7. Januar 1610 sein primitives Fernrohr auf Jupiter richtete, bemerkte er um den Planeten eine Reihe von vier Sternen, deren mehrtägige Verfolgung keinen Zweifel darüber ließ, daß es sich um Monde handle, die in geordneten Bahnen den Planeten umkreisen. Seitdem haben die vier alten Jupitertrabanten der Astronomie hervorragende Dienste geleistet. Ihre mannigfachen Erscheinungen, insbesondere die Verfinsterungen, können im voraus berechnet und für rohe Längenbestimmungen verwertet werden, ein Gedanke, dessen Ursprung gleichfalls bereits auf Galilei zurückzuführen ist. Die Beobachtung dieser Finsternisse — wohl eines jeden angehenden Astronomen erste Beobachtungstätigkeit am Fernrohr — hat dann die Vorstellung von der unmeßbaren Lichtgeschwindigkeit im Raume zerstört und uns einen ausgezeichneten Maßstab für die Dimensionen der vom Lichtstrahl in der Zeiteinheit zurückgelegten Strecke gegeben, lange bevor noch jemand daran denken mochte, der Frage auf Grund terrestrischer Versuche näherzutreten.

Die kosmischen Verhältnisse, die in der Welt der alten großen Jupitertrabanten herrschen, mögen der besseren Übersicht halber in einer Tabelle Platz finden.

Trabant	Abstand in Jupiterradien	Abstand in km	Umlaufszeit	Durchmesser in km	Helligkeit in Sterngrößen
1.	5,9	427 000	$1^d\,18^h\,28^m$	3 950	5,6
2.	9,4	679 000	3 13 14	3 290	5,7
3.	15,0	1 084 000	7 3 43	5 730	5,0
4.	26,4	1 906 000	16 16 32	5 380	6,3

Die Analogien, die beim Vergleich dieser Daten mit den entsprechenden Planetenelementen hervortreten, sind ganz auffällig. Hier wie dort bemerkt man eine gemeinsame Bahnebene der Schwesterwelten, eine Zunahme der Abstände nach einer ähnlichen Regel, schließlich eine deutliche Gruppierung in kleinere und größere Weltkörper, wobei auch der Sinn der Anordnung erhalten bleibt. Die Ähnlichkeit zwischen der Jupiterwelt und dem Sonnensystem, die bereits Galilei auffiel, ist also nicht nur eine rein äußerliche; auch der Werde- und Entwicklungsgang der Haupt- und der Nebenplaneten des Sonnensystems ist ohne Frage nahezu der gleiche gewesen.

Von der wissenschaftlichen Bedeutung der Verfinsterungen der Jupitermonde war bereits vorhin die Rede. Wegen der Größe des Hauptplaneten, wegen seines langen Schattens und vor allem wegen der geringen Neigung der Trabantenbahnen zur Jupiterbahn ereignen sich bei den drei inneren Monden diese Finsternisse regelmäßig während eines jeden Umlaufs; nur der vierte Satellit kann längere Zeit hindurch oberhalb bzw. unterhalb des Jupiterschattens vorübergehen, ohne ihn zu durchqueren. Neben den Finsternissen sind die Vorübergänge der Satelliten und ihrer Schatten vor der Jupiterscheibe sowie die Bedeckungen der Monde durch Jupiter von Interesse, da auch hier lediglich die genaue Zeit der Erscheinung genügt, um die Feststellung der Lage des betreffenden Mondes im Raume, also eine exakte astronomische Positionsbestimmung zu ermöglichen. Die meisten älteren über die Satellitenbahnen des Jupiter gewonnenen Daten sind auch in erster Linie auf dem genannten Wege, weniger durch direkte mikrometrische Messungen erzielt worden.

Keiner der Trabanten erreicht einen scheinbaren Durchmesser von 2″, und es ist daher so gut wie unmöglich, von der direkten Betrachtung der winzigen Scheibchen sich Erfolg in physischer Beziehung zu versprechen, obwohl an einigen großen Instrumenten der Neuzeit, insbesondere am Lickrefraktor, bereits Skizzen der Oberfläche einzelner Jupitertrabanten angefertigt worden sind. Viel eher dürfte eine Verfolgung der, wie man festgestellt hat, ein wenig wechselnden Helligkeitswerte der Trabanten in physischer Hinsicht Resultate versprechen. Schon die mit den Durchmessern nicht harmonierenden Sterngrößenwerte zeigen, daß die physische Konstitution der Monde nicht die gleiche ist. Aus gewissen Helligkeitsänderungen, die zweifels-

frei nachgewiesen sind, läßt sich fernerhin ein Schluß darauf ziehen, daß die Jupitermonde eine Rotation haben, die, ähnlich wie beim Trabanten der Erde, mit der Revolutionszeit, übereinstimmt.

Die neuen Jupitermonde.

Eine besondere Stellung nehmen im Jupitersystem die neuen in den letzten Jahrzehnten entdeckten kleinen Monde ein, deren Entfernungs- und Bewegungsverhältnisse die nachstehenden Zahlenwerte veranschaulichen:

Trabant	Abstand in Jupiterradien	Abstand in km	Umlaufszeit	Helligkeit in Sterngrößen	Entdeckungsjahr
5.	2,5	184 000	$0^d\,11^h\,57^m$	13	1892
6.	160	11 570 000	251^d	14	1904
7.	167	12 070 000	265	16	1905
8.	330	23 860 000	739	16	1908
9.	345	24 900 000	800	19	1914

Abgesehen vom 5. Monde, dem man im Jupitersystem eine ähnliche Rolle zuschreiben könnte wie dem Merkur unter den Planeten, ist die Stellung der vier äußersten Trabanten völlig abnorm und durch die ungeheure Entfernung und die damit verknüpfte lange Umlaufszeit gekennzeichnet. Tatsächlich war man auch bezüglich des 8. Mondes längere Zeit im unklaren, ob man es mit einem kleinen Planeten oder einem Begleiter des Jupiter zu tun habe. Die Schwierigkeit, die dabei vorlag, wurde noch durch den Umstand vergrößert, daß dieser Mond eine rückläufige Bewegung zeigt, und daß infolge seines großen Jupiterabstandes die Bewegung der Erde im Raume seine scheinbare Stellung von Jupiter abweichend beeinflußt, so daß die fortlaufenden Beobachtungen eine sehr komplizierte, mit dem Zentralkörper scheinbar gar nicht mehr zusammenhängende Bewegung dieses Satelliten unter den Sternen ergaben (Fig. 24). Auch kosmogonisch wird man den vier äußersten Trabanten eine Sonderstellung einräumen müssen. Nachdem durch die Beobachtungen der letzten Jahre die Grenzen des Asteroidenringes schon ein wenig über die Jupiterbahn hinaus ausgedehnt worden sind, hätte der Gedanke an die dauernde oder vorübergehende Gefangennahme eines kleinen Planeten durch Jupiter sehr viel Wahrscheinlichkeit für sich, wenn nicht auch der äußerste Saturntrabant in dieselbe Kategorie von Planetenbegleitern einzureihen wäre. Die Vermutung läßt sich also vorläufig nicht ohne weiteres in bejahendem Sinne entscheiden.

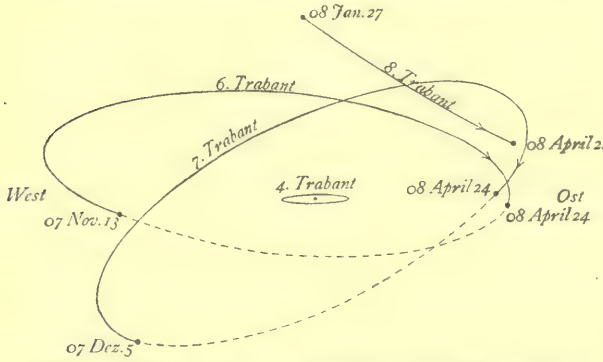


Fig. 24. Bahnlage des 4., 6., 7. und 8. Jupitermondes 1907—1908.

Die Monde des Saturn.

Mehrere Jahrzehnte hindurch bildeten die Jupitertrabanten neben dem Erdbegleiter die einzigen bekannten Satellitenwelten im Sonnensystem. Die

größte Merkwürdigkeit des nächsten Planeten, der Ring des Saturn, hatte nach Erfindung des Fernrohrs so lange die ausschließliche Aufmerksamkeit der Beobachter in Anspruch genommen, daß erst Huygens, zu einer Zeit, als die Ringe nur in Gestalt dünner Lichtfäden den Planeten kreuzten (1655), auf den hellsten Saturnmond Titan aufmerksam wurde. Während der nächsten beiden Perioden der Unsichtbarkeit der Ringe fand dann Cassini zwischen 1670 und 1685 vier weitere Monde, zu denen schließlich durch die sorgfältigen Nachforschungen Herschels und Bonds im 18. und 19. Jahrhundert drei weitere hinzukamen. Die wichtigsten Bewegungsverhältnisse dieser acht sowie der neuerdings hinzugekommenen zwei neuen Trabanten sind ähnlich wie bei Jupiter in der nachstehenden Übersicht wieder tabellarisch zusammengestellt:

Trabant	Abstand in Saturnradien	Abstand in km	Umlaufszeit	Helligkeit in Sterngrößen
Mimas	3,1	181 000	$0^d\ 22^h\ 37^m$	13
Enceladus	3,9	232 000	1 8 53	12
Tethys.....	4,9	288 000	1 21 18	11
Dione	6,2	369 000	2 17 41	11
Rhea..... ..	8,7	515 000	4 12 25	10
Titan.....	20,2	1 193 000	15 22 41	9
Themis	24,2	1 427 000	20 20 24	18
Hyperion	24,5	1 445 000	21 6 38	14
Japetus	58,9	3 476 000	79 7 56	11
Phoebe.....	214,4	12 650 000	550 10 35	17

Themis und Phoebe, die beiden neuen photographisch entdeckten Monde, weisen jeder für sich besondere Eigentümlichkeiten auf, der erste insbesondere dadurch, daß er nahezu in der Bahn des Hyperion seinen Weg um Saturn beschreibt, der letzte durch den großen Abstand und eine rückläufige Bewegung, die ihm eine genau analoge Stellung im Trabantensystem des Saturn einräumt, wie sie auch der äußerste Begleiter des Jupiter innehat Aber auch die älteren Monde bieten theoretisch für den Astronomen außerordentlich viel Interessantes, in erster Linie durch die Störungen, die sie aufeinander ausüben. Man überzeugt sich leicht, daß z. B. die doppelte Umlaufszeit des Mimas der Revolution des Tethys gleichkommt. Verdoppelt man in gleicher Weise die Umlaufszeit des Enceladus, so kommt man auf die Revolutionsdauer der Dione usf. Die vier inneren Monde, die übrigens mit dem fünften genau die gleiche Bahnebene teilen, zeigen also ein sog. kommensurables Umlaufsverhältnis; ihre gegenseitigen Stellungen zueinander und damit auch ihre gegenseitigen Störungen wiederholen sich bereits nach wenigen Umläufen, wodurch eine Summierung der gegenseitigen Anziehungswirkungen und damit auch starke Änderungen der Bahnelemente hervorgerufen werden.

Die bei den Jupitertrabanten wahrgenommenen Helligkeitsänderungen treten im Saturnsystem z. T. noch auffälliger hervor. Besonders merkwürdig und schon von Cassini im 17. Jahrhundert festgestellt ist der Lichtwechsel

des Japetus, der bei westlicher Elongation die größte, bei östlicher die geringste Helligkeit aufweist. Der Betrag der Änderung umfaßt 1,7 Größenklassen, so daß die Oberfläche dieses Mondes zwei durch große Albedoverschiedenheit getrennte Halbkugeln aufweisen dürfte. Da die Periode der Lichtänderungen mit der Umlaufszeit vollständig übereinstimmt, so kann es kaum einem Zweifel unterliegen, daß Japetus dem Saturn genau ebenso wie unser Mond der Erde stets dieselbe Seite zukehrt.

Der Ring.

Der merkwürdigste Begleiter des Saturn ist ohne Frage sein Ring oder vielmehr die Schar von Ringen, die ihn umgibt. Es ist bereits S. 285 angedeutet worden, daß diesem Ring nur äußerlich in der Welt der Nebenplaneten eine Sonderstellung zukommt, da er in Wirklichkeit aus einer ungeheuer großen Trabantenschar besteht. Dieses System von äußerst flachen Ringen, das den Planeten in seiner Äquatorialebene umgibt, hat Galilei und seinen Nachfolgern viel Kopfzerbrechen bereitet, da die ersten unvollkommenen Instrumente des 17. Jahrhunderts von der räumlichen Lage des Ringes keine richtige Vorstellung gaben, sondern ihn in Henkelform, am Planeten gleichsam festsitzend, abbildeten. In Fig. 25 sind nach einer Abbildung in Gassendis gesammelten Werken die merkwürdigen Formen wiedergegeben, in denen sich diesem Beobachter Saturn zwischen 1633 und 1651 darstellte.

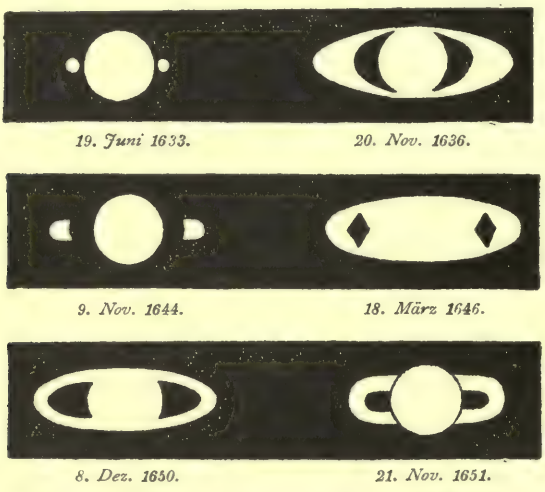


Fig. 25. Zeichnungen des Saturn aus dem 17. Jahrhundert.

Selbst in einer Zeit, in der kosmische Überraschungen an der Tagesordnung waren, mochte niemand an einen freischwebenden und doch den im Raume fortschreitenden Planeten dauernd begleitenden Ring denken. Hierzu kam eine in Wirklichkeit scheinbare, zunächst aber für wirklich gehaltene periodische Veränderung im Anblick des Ringes, die uns heute vollkommen natürlich erscheint, damals aber selbst auf so klare Geister wie Galilei geradezu verblüffend wirkte. Die bis dahin wiederholt beobachteten Anhängsel des Planeten verschwanden nämlich 1612 vollständig, um dann bald wiederzuerscheinen, ein Phänomen, das sich während eines Saturnumlaufs zweimal wiederholt, jedoch vor der Erkenntnis der Ringnatur der Henkel mit Recht für paradox erklärt wurde und dem Florentiner Astronomen einen Teil der Entdeckerfreude geraubt zu haben scheint.

Die Lösung des Saturnrätsels verdanken wir Huygens, der um 1654, also ein halbes Jahrhundert nach Entdeckung des Fernrohrs, endlich feststellen konnte, „daß Saturn von einem freischwebenden dünnen, gegen die Ekliptik

geneigten Ringe umgeben sei". Genau ebenso, wie die Erde infolge ihrer Achsenneigung beim Umlauf um die Sonne dieser im Sommer den Nord-, im Winter den Südpol zukehrt, ebenso erblicken wir Erdbewohner — für den fernen Saturn die nächsten Nachbarn der Sonne — infolge der Achsenneigung des Planeten von 28^0 bald seinen Nord-, bald seinen Südpol, d. h. es ist uns damit auch in der einen Hälfte des Umlaufs die nördliche, in der anderen die südliche Fläche des Ringes zugeneigt. Während einer kurzen dazwischenliegenden Zeit ist von dem Ring nur die Kante sichtbar, die so dünn ist, daß sie dann, wie zur Zeit Galileis und zuletzt 1907, auf mehrere Wochen ganz verschwindet.

Von Huygens bis in die neueste Zeit hinein haben die Astronomen dem Saturnring ihre besondere Aufmerksamkeit zugewendet. Im Jahre 1675 glückte zunächst Cassini der sichere Nachweis einer Trennungslinie zwischen einem schmalen äußeren Ring A und einem breiteren inneren B. Das folgende, 18. Jahrhundert, in dem die physische Planetenkunde überhaupt stark vernachlässigt wurde, brachte auch bei Saturn keine neuen Ergebnisse. Erst im Jahre 1837 bemerkte Encke einen weiteren feinen Schattenriß auf dem Ring A, doch ist bis heute noch nicht entschieden, ob diese zarte, zuweilen nur schwer sichtbare Linie eine wirkliche Unterbrechung im Sinne der Cassinischen Spalte ist. Auch auf dem Ring B stellte man bald einige Einzelheiten fest, insbesondere einen starken Helligkeitsabfall nach dem Planeten zu. An der Stelle, wohin alle bisherigen Beobachter die innere Kante des Ringes versetzten, fand endlich Bond in Cambridge (Mass.) um 1850 einen dritten Ring C, der relativ sehr matt und dunkel ist und daher auch als Flor- oder Kreppring bezeichnet wird. Er ist von dem Nachbarring B nur durch einen Sprung in der Helligkeit, wahrscheinlich aber durch keine räumliche Lücke getrennt (Fig. 21).

Die Summe der Ringbreiten entspricht etwa dem äquatorialen Planetenhalbmesser und beträgt genauer 68000 km. Auf Ring A entfallen hiervon 18000, auf die Cassinische Trennung 3500, auf den Ring B 29000, auf C 17500 km. Die Dicke des flachen Ringsystems ist tatsächlich unmeßbar klein, und in den Zeitmomenten, in denen die Ringebene genau durch die Erde ging, hat man auch in großen Fernrohren den Planeten vollkommen ringlos beobachtet. Hieraus läßt sich vielleicht nur der Schluß ziehen, daß die Dicke des Ringes den Betrag von 100 km kaum erreichen dürfte.

Physische Beschaffenheit des Saturnringes.

Zu dem Rätsel, das der Saturnring als solcher den ersten Beobachtern am Fernrohr bot, gesellte sich im 18. Jahrhundert ein neues, als man anfing, die Daseinsbedingungen dieses eigentümlichen Planetenschmuckes etwas genauer zu prüfen. Im Weltall sind alle stabilen Erscheinungen der Körper in erster Linie durch ihr Massen- und Entfernungsverhältnis bedingt. Man folgerte somit ganz richtig, daß sich schon aus dem ungestörten Bestehen der Ringe auf theoretischem Wege Anhaltspunkte über den Aggregatzustand dieser Gebilde gewinnen lassen mußten. „Wenn man", so bemerkt Clerk Maxwell, „jenen großen über dem Äquator des Planeten ohne sichtbaren Zusammenhang

ausgespannten Bogen einmal wirklich gesehen hat, so kommt der Geist nicht wieder zur Ruhe. Wir können nicht einfach erklären, daß es sich so verhält, und ihn als eine Beobachtungstatsache der Natur beschreiben, die keine Deutung zuläßt oder verlangt. Wir müssen entweder seine Bewegung nach den Prinzipien der Mechanik erklären oder eingestehen, daß im Bereiche der Saturnwelt eine Bewegung nach Gesetzen vor sich geht, die zu entschleiern wir nicht imstande sind."

Es ist sehr merkwürdig, daß bereits einer der ersten ernsteren Saturnbeobachter, der bereits mehrfach genannte Cassini, wenigstens in Form einer Hypothese die Möglichkeit der Trabantennatur der Ringe aussprach, doch scheint die nur beiläufig zum Ausdruck gebrachte Vermutung allmählich vergessen worden zu sein, da selbst die kräftigsten Instrumente des 18. und 19. Jahrhunderts den Ring zwar ein wenig abschattiert, aber sonst völlig strukturlos zeigten. Aufmerksame Beobachtungen ergaben allerdings schon frühzeitig einige Anzeichen für eine meteorische Konstitution des Ringes. Um die Zeit des Durchganges der Ringebene durch die Erde bemerkte man in dem dann fadenförmigen Bilde der Ringe Lichtfaden, der die Kugel durchquerte, gewisse Unregelmäßigkeiten von sehr veränderlicher Form. Die Enckesche dunkle Linie sowie die Helligkeitsabstufungen der Ringe schienen trotz der Schwierigkeit der Beobachtungen gleichfalls einem Wechsel zu unterliegen. Schließlich wurde der dunkle, halb durchsichtige innere Florring aufgefunden und mit ihm ein Beweis gegen die feste Natur wenigstens dieses Gebildes geliefert. Alle diese Argumente konnten jedoch nicht eher zur Geltung kommen, bis theoretisch und praktisch die Unmöglichkeit eines festen, einen Planeten frei umschwebenden Ringes erwiesen war.

Theoretische Untersuchungen über die Stabilität des Ringes.

Die Untersuchungen, die in dieser Beziehung von Laplace, Roche, Maxwell und Hirn angestellt worden sind, bezogen sich auf die Stabilitätsverhältnisse des im Saturn uns von der Natur gegebenen Beispiels. Zwar wurde hier z. T. auf gänzlich verschiedenen Wegen der Nachweis geführt, daß die bestehenden Naturgesetze ausschließlich auf einen meteorischen Saturnring führen, doch boten diese Arbeiten trotz ihres hohen Wertes der Praxis zunächst keinen Weg, auf dem eine Entscheidung zu erreichen war. Erst das Studium der Beleuchtungsverhältnisse im Saturnsystem, das wir Seeliger verdanken, brachte die Frage ihrer Lösung um einen Schritt näher. Da der Ring auf alle Fälle sein Licht von der Sonne erhält, so muß ja zunächst seine Gesamthelligkeit sich stets mit der Stellung des Planeten zum Tagesgestirn in Verbindung bringen lassen. Ein flacher, einheitlich fester Ring wird aber dabei sich anders verhalten als ein dichter Meteorkranz, bei dessen Beleuchtung sich sofort die Wirkung der Phase, der gegenseitigen Beschattung usw. geltend macht. Es war also lediglich nötig, die Abhängigkeit der Gesamthelligkeit des Saturn von der Ringöffnung für die beiden Hypothesen festzustellen und an dem vorhandenen Material die Gültigkeit der einen oder der anderen Annahme nachzuweisen. Da das Ergebnis keinen Zweifel darüber ließ, daß die Beobachtungen nur mit einem Staubring in Einklang zu

bringen sind, so war damit für die Fachwelt die Angelegenheit so gut wie entschieden.

Direkter Nachweis der meteorischen Zusammensetzung.

Ein endgültiger, auch für weitere Kreise verständlicher Nachweis für die meteorische Konstitution des Saturnringes ist dann um die letzte Jahrhundertwende durch Anwendung des Dopplerschen Prinzips erzielt worden, womit auch für die bis dahin unentschiedene Rotation des Ringsystems numerische Zahlenwerte gewonnen worden sind. Die spektroskopischen Aufnahmen, die Keeler, Deslandres und Belopolski von Saturn und dessen Ring um 1895 ausgeführt haben, ließen zweifellos erkennen, daß der Ring eine Bewegung um den Hauptplaneten ausführt, jedoch nicht mit unveränderlicher Winkelgeschwindigkeit, wie sie noch Herschel annahm und ein fester Ring auch besitzen müßte. Die lineare Bewegung der einzelnen Ringteilchen erwies sich vielmehr als um so größer, je näher diese dem Planeten stehen; jedes Ringelement vollführt mithin um Saturn eine eigene Bewegung, was nur möglich ist, wenn der Ring aus einzelnen, getrennten Bestandteilen zusammengesetzt ist. Die beobachtete Ortsänderung entspricht dabei vollkommen den Anforderungen des 3. Keplerschen Gesetzes, so daß man jetzt für jeden Punkt des Ringsystems die zugehörige Umlaufsgeschwindigkeit im voraus berechnen kann. In guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Bewegungen im Visionsradius findet man für die Revolution der äußersten Randzone des Ringes 14^h bis 15^h, während die innersten Teilchen des untersuchten hellen Ringes schon in 7^h bis 8^h den Planeten umkreisen. Für die Innenkante des dunklen Florringes darf eine etwa doppelt so rasche Bewegung angenommen werden wie für die darunter befindlichen Teile der Planetenoberfläche, wodurch sehr ähnliche Verhältnisse geschaffen sind wie beim ersten Marssatelliten.

Wie man einsehen wird, hat die Ergründung der Natur des Saturnringes diesem einzigartigen Gebilde in unserem Planetensystem die alte Bedeutung, die ihm die Kant-Laplacesche Hypothese als Vorläufer der Satellitenbildung zuschrieb, entzogen. Nach unseren heutigen Kenntnissen ist der Ring nicht als ein Urstadium künftiger Monde, sondern als eine den anderen Begleitern Saturns ebenbürtig zur Seite stehende, vollständig entwickelte große Trabantenfamilie anzusehen. Die einstige Entstehung dieses flachen Meteorgürtels, der uns den Eindruck eines Ringes vortäuscht, ist natürlich heute noch ebenso unklar wie die Bildung der ihm im Wesen ähnlichen, wenngleich viel dünner gesäten Asteroidengruppe zwischen Mars und Jupiter.

Die Uranusmonde.

Gegenüber den interessanten Verhältnissen im Bereiche der Satellitenwelt von Jupiter und Saturn erwecken die Monde der beiden äußersten Planeten nur noch ein beschränktes Interesse. Von den im Laufe der Zeit durch Herschel und Lassell aufgefundenen Trabanten des Uranus sind vier gesichert; ihre Zahl ist trotz eifriger Nachforschungen durch neue Schwesterwelten nicht bereichert worden. Sie sind sämtlich merklich kleiner als der Erdmond und zeigen entsprechend der bedeutenden Masse des Uranus trotz ihres z. T. größeren Abstandes vom Zentralkörper durchweg kürzere Umlaufszeiten:

Trabant	Abstand in Uranusradien	Abstand in km	Umlaufszeit
Ariel	7,0	177 000	$2^d\ 12^h\ 29^m$
Umbriel	9,9	249 000	4 3 28
Titania	16,1	405 000	8 16 56
Oberon	21,5	542 000	13 11 7

Die Bewegung dieser Monde erfolgt rückläufig, und zwar in einer Ebene, die die Uranusbahn unter 98^0, also nahe senkrecht, schneidet. Im Gegensatz zu den sonstigen scheinbaren Bewegungen der Satelliten, die wir ausschließlich in starker Projektion zu sehen und zu beobachten gewohnt sind, erblickt man somit die Bahnen der Uranusmonde während des 84jährigen Umlaufs des Planeten zweimal in senkrechter Aufsicht, ähnlich wie bei einigen Doppelsternen, deren Bahnen lotrecht auf der Blickrichtung stehen. Auf die Übereinstimmung in der Rotationsrichtung des Uranus und der Umlaufsbewegung seiner Monde ist bereits früher kurz hingewiesen worden.

Der Trabant des Neptun.

Einen Satelliten von recht ansehnlicher Größe, die etwa den Dimensionen unseres Erdmondes nahekommen mag, weist noch der letzte Planet des Sonnensystems, Neptun, auf. Der Neptuntrabant hat von seinem Zentralkörper einen Abstand von 15 Radien oder rund 454000 km und vollzieht seinen Umlauf in $5^d\ 21^h\ 2^m$. Ein großer Teil der für die Bahnbestimmung erforderlichen Messungen dieses schwachen Lichtpünktchens, das Neptun auf seiner weiten Reise um die Sonne dauernd begleitet, ist photographisch ausgeführt worden, schon aus dem Grunde, weil der Trabant auf die photographische Platte merklich intensiver einwirkt als bei visueller Beobachtung auf das Auge. Da bei Neptun eine solche Abweichung des photographischen vom visuellen Helligkeitswerte nicht besteht, ist damit ein gewisser Unterschied der physischen Beschaffenheit zwischen Planet und Mond erwiesen.

IV. Die physische Beschaffenheit der Kometen. Mit den Kometen, die von Zeit zu Zeit gänzlich unerwartet, zuweilen in erschreckend großer Gestalt, doch stets nur für wenige Wochen sichtbar, am Himmel auftauchten, wußte das ganze Altertum und Mittelalter nichts anzufangen. Nach der Lehre des Aristoteles, die bis ins 17. Jahrhundert Geltung behielt, waren die Kometen keine Himmelskörper, unter die sie sich wegen ihres unregelmäßigen Erscheinens ja auch sehr schwer einreihen ließen, sondern Ausdünstungen der Erde, die sich in den höchsten Schichten der Atmosphäre entzündeten. Dieser Auffassung lag eine durchaus zutreffende Beobachtung zugrunde. Die Haupteigentümlichkeit der Kometen besteht nämlich in dem stets von der Sonne abgewandten Schweife. Da sich nun die Kometen in ihrem größten Glanze nur in nächster Nähe der Sonne zeigen, so werden die auffälligsten Erscheinungen des Abends kurz nach Sonnenuntergang und des Morgens kurz vor Sonnenaufgang zu sehen sein, und zwar wird dann nach dem eben ausgesprochenen Gesetze der Schweif stets von der unter dem Horizont stehenden Sonne weg, d. h. nach oben gerichtet sein, wodurch ganz naturgemäß eine

gewisse Ähnlichkeit mit einer aufsteigenden Flamme (Fig. 26) hervorgerufen wird.

Ältere Anschauungen über die Kometen.

Bei dem das ganze Altertum beherrschenden Glauben an himmlische Vorzeichen mußten, wie schon im ersten Abschnitte dieses Werkes ausgeführt wurde, selbstverständlich auch die oft überwältigend großartigen Kometenerscheinungen als besonders eindringliche Verkünder der Zukunft aufgefaßt werden, und zahllose Schriften beschäftigten sich mit der Deutung dieser Himmelszeichen. Aber auch dieser Aberglaube hat sein Gutes gehabt. Er bewirkte, daß die auffälligen Kometenerscheinungen, allerdings zum Teil phantastisch ausgeschmückt, aber doch im allgemeinen nach Ort und Zeit zutreffend, in den Chroniken verzeichnet wurden und uns auf diese Art überliefert worden sind. Für zahlreiche der älteren Kometen sind diese Berichte ausreichend gewesen, um wenigstens näherungsweis eine Berechnung ihrer Bahn zu ermöglichen. So ist es z. B. gelungen, die Erscheinungen des Halleyschen Kometen lückenlos bis zum Jahre 989, mit einigen Unterbrechungen sogar bis in das 2. Jahrhundert v. Chr. zurück zu verfolgen.

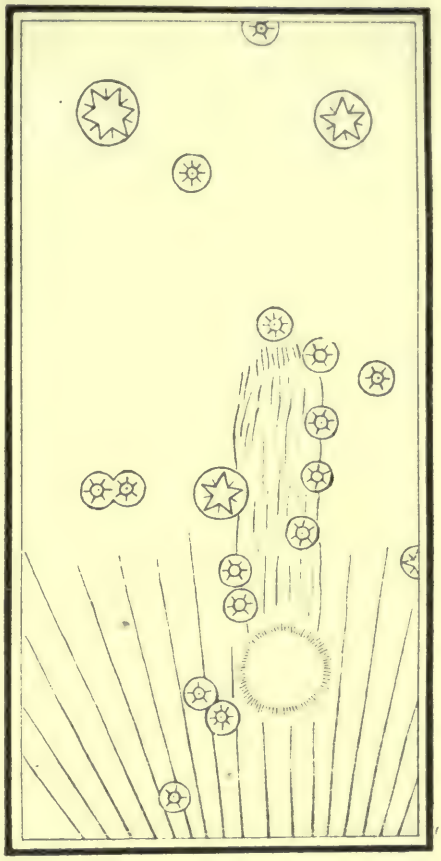


Fig. 26. Halleyscher Komet im Jahre 1066 nach seinem Austritt aus den Sonnenstrahlen (nach Lubieniecki, Theatrum Cometicum).

Trotz einer ganzen Anzahl durchaus neuzeitlich anmutender Anschauungen über die Kometen, die wir schon im Altertum bei dem Dichter Manilius, bei Seneka u. a. vorfinden, enthalten die älteren astronomischen Bücher, insbesondere die Werke von Ptolemäus und Kopernikus über die Kometen noch nicht das Geringste. Erst der Nachweis einer sehr kleinen Parallaxe, den die Messungen von Regiomontanus, Tycho und Kepler für einige Kometen erbrachten, sicherte ihnen die kosmische Stellung. Damit war nach Lösung der komplizierten Planetenbewegung im Sinne der kopernikanischen Theorie auch die Erforschung und Berechnung der Kometenbahnen nur noch eine Frage der Zeit geworden, und schon die nächsten helleren, längere Zeit sichtbaren Schweifsterne mußten in dieser Beziehung die Entscheidung bringen.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde die Entwicklung der Bahnbestimmung der Kometen von der ersten durch Hevelius ausgesprochenen Hypothese einer parabolischen Bahnkrümmung bis zu der endgültigen Lösung des

Problems durch Dörfel, Newton und Halley eingehend behandelt. Nachdem die kosmische Stellung der Kometen hierdurch festgestellt war, wandte sich auch ihrer physischen Erforschung größeres Interesse zu. Diese hat jedoch große Schwierigkeiten bereitet und den Astronomen manche Rätsel aufgegeben, deren Lösung auch heutigentags noch nicht in allen Einzelheiten geglückt ist.

Gegenüber der individuellen Behandlung aller anderen Weltkörper ist man bei den Kometen mit den wenigen Ausnahmen der durchweg lichtschwachen periodischen Schweifsterne auf eine summarische Beschreibung ihrer Eigentümlichkeiten angewiesen. Nicht etwa, als ob alle Kometen im wesentlichen dasselbe Aussehen zeigten. Im Gegenteil, jeder Schweifstern bildet nicht nur durch seine Bahnelemente, sondern auch durch seine physischen Eigentümlichkeiten ein Individuum für sich, und gerade die Fülle des Materials verhindert eine selbständige Behandlung der Erscheinungen, die er während seiner kurzen, sich vielleicht erst nach Jahrtausenden wiederholenden Gastrolle im Sonnensystem dem Beschauer dargeboten hat.

Aussehen der Kometen.

Was uns bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts von physischen Erscheinungen der Kometen überliefert worden ist, bezieht sich ausschließlich auf die Größe und Gestalt der Schweife. Läßt man die älteren, durch die Phantasie der Beobachter verunstalteten Darstellungen außer Betracht, so lassen die Beschreibungen und Abbildungen so gut wie gar keine physikalische Schlußfolgerung zu. Man kann aus ihnen lediglich entnehmen, daß, solange Kometen überhaupt beobachtet worden sind, ihre Schweife von der Sonne abgekehrt waren und ihre größte und schönste Entfaltung um die Zeit des Durchgangs des Gestirns durch die Sonnennähe zeigten. Es werden daneben noch ein- und mehrfache, gerade und gekrümmte, glatte und gestreifte Schweife erwähnt, jedoch fast durchweg in einer Form der Darstellung, die jede weitere Verwertung der Angaben so gut wie ausschließt. Der wissenschaftliche Unwert dieses älteren Materials fällt jedoch nicht allzusehr ins Gewicht. Solange die Beobachtungen ausschließlich auf den Anblick der Kometen im Fernrohr und die zeichnerische Darstellung beschränkt waren, konnte bei der Schwierigkeit aller direkten visuellen Wahrnehmungen an eine tiefere Ergründung der physischen Konstitution dieser Gestirne nicht gedacht werden. Selbst so glänzende Erscheinungen des vergangenen Jahrhunderts, wie die Kometen von 1811, 1843, 1858 und 1861, gingen vorüber, ohne zunächst unsere Kenntnisse über das Wesen dieser Gestirne merklich bereichert zu haben.

Wie seltsam uns auch die Berichte über die Kometenfurcht vergangener Jahrhunderte anmuten mögen, so unterliegt es doch keinem Zweifel, daß die Entwicklung eines großen Kometen noch heute das merkwürdigste Phänomen darstellt, das uns die Natur am gestirnten Himmel darzubieten vermag. Zur Bildung der Planeten und Monde haben sicher Äonen von Jahren gehört, und selbst die Geschichte der obersten Schichten des Erdkörpers zählt nach Jahrmillionen; hier entfaltet sich dagegen oft schon innerhalb weniger

Tage ein Gestirn zu einer alle Augen auf sich lenkenden Erscheinung. Bei seiner Entdeckung als teleskopischer Komet war der Ankömmling oft lediglich im Fernrohr und auch da nur als ein kleiner Nebel mit zentraler Verdichtung sichtbar. Bei wachsender Annäherung an die Sonne hat sich jedoch das Bild völlig verändert. Der Kern und die ihn umgebenden Nebelhüllen haben eine schärfere Begrenzung erhalten, und es tritt der sog. Kopf des Kometen deutlich hervor, aus dem nebelartige Materie nach der Sonne hin ausströmt, doch, von einer eigenartigen von der Sonne ausgehenden Kraft abgestoßen, sofort wieder in der von der Sonne abgewandten Richtung in den Raum hinausfliegt. Der undeutliche verwaschene Nebel hat sich also unter dem Einfluß der Sonne in einen planetenartigen runden oder elliptischen Körper verwandelt. Dieser Körper bildet den Abschluß eines weiten Nebelrohrs, dessen Achse in der Ebene der Kometenbahn liegt und von der Sonne fortgerichtet ist. Untersucht man die Herkunft dieses Nebelrohrs, das uns als Schweif erscheint, etwas genauer, so findet man, daß es seinen Ursprung aus dem Kern selbst nimmt. Die Materie, die den Schweif zusammensetzt, wird nicht nur desto heller, je mehr wir uns dem Kern nähern; sie gewinnt hier auch eine bestimmtere Skruktur in der Form von Hüllen oder fächerförmigen Ausströmungen, die aus dem Kern ihren Ausgang nehmen. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß Hülle und Schweif ein materielles Auflösungsprodukt des eigentlichen Kerns darstellen und für den Kometen selbst unwiederbringlich verloren gehen. Treffend hat man die Schweife mit dem Dampf oder Rauch einer fahrenden Lokomotive verglichen; sie erscheinen wie dieser mit dem Ursprungsherd dauernd verbunden, stellen jedoch in jedem Augenblick eine vergängliche Neubildung dar.

Photographische Aufnahmen.

Die für das Auge meist homogene Gestaltung der Kometenschweife verschwindet übrigens in der Regel, wenn man zum genaueren Studium dieser Gebilde die lichtempfindliche Platte verwendet. Hier hat die Photographie in überraschend kurzer Zeit eine hervorragende Bedeutung erlangt, denn ähnlich wie die Nebelflecke enthalten auch die meisten Kometen in erster Linie photographisch wirksame Strahlenarten. Da der Effekt durch eine ausgedehnte Expositionsdauer noch verstärkt werden kann, so ist es möglich, mit den Instrumenten der Neuzeit alle Einzelheiten des Kometen von der Struktur der Kopfumgebung bis zu den feinsten Fasern des Schweifendes photographisch festzuhalten. Die in der Erforschung der Nebelflecken so erfolgreichen Spiegelteleskope haben auch hier eine ungeahnte Fülle von Einzelheiten ans Licht gebracht, so daß die wenig auffälligen Kometenerscheinungen der letzten Jahre uns mehr offenbart haben als alle früheren Jahrhunderte zusammengenommen.

Nur selten entsprechen diese Kometenphotographien dem gleichzeitigen direkten Anblick im Fernrohr. Im allgemeinen tritt der Schweif auf dem Plattenbilde wesentlich deutlicher hervor, er stellt auch hier ein ungleich komplizierteres Gebilde dar, das sich aus ganzen Büscheln von geradlinig und gekrümmt, zuweilen sogar wellenartig verlaufenden Strahlen der Kopf-

materie zusammensetzt. In kurzen Zeitabständen aufgenommene Photogramme lassen stärkere Kerneruptionen noch längere Zeit hindurch im Schweif verfolgen und die räumliche Bewegung der ausgestoßenen Materie ableiten. Diese photographischen Bilder ähneln zuweilen ganz auffallend strömenden Rauchwolken und erinnern durch ihre phantastische Gestalt oft an die vergilbten Kometenzeichnungen vergangener Jahrhunderte.

Größe und geringe Masse der Kometen.

Die Dimensionen der Kometen, ihrer Köpfe und Schweife grenzen oft ans Fabelhafte. In dem Kopf des berühmten Kometen von 1811 hätten, um nur ein Beispiel zu nennen, rund 350 Kugeln von der Größe des Jupiter Platz gehabt, und sein Schweif erstreckte sich mindestens über einen Raum, der dem Abstande Sonne — Erde, also 150 Millionen km, gleich kam. Um so merkwürdiger ist es, daß diese riesigen Weltkörper in Wirklichkeit kaum mehr als ein „sichtbares Nichts" darstellen. Im Sinne der Gravitation erscheinen sie vollständig masselos, und bei Bedeckungen lassen sie das Licht der Sterne völlig ungebrochen und ungedämpft hindurch. Selbst ihre Kerne zeigen, wo sich Gelegenheit zu entsprechenden Beobachtungen bietet, noch eine Durchsichtigkeit, die angesichts des oft sehr beträchtlichen Glanzes geradezu verblüffend wirkt. Wenn ein Komet, wie derjenige von 1882, unmittelbar neben der Sonne am hellen Tage sichtbar ist und beim Eintritt vor die Sonnenscheibe vollständig verschwindet, wenn der Lexellsche Komet von 1770 oder der fünfte Komet von 1889 die Schar der Jupitertrabanten durchqueren, ohne hier auch nur die geringste Störung hervorzurufen, so übersteigt der geringe Grad der optischen und mechanischen Dichte dieser Himmelskörper tatsächlich jede Vorstellung. Alle bisherigen Versuche, die Masse eines Kometen aus optischen Eigentümlichkeiten oder aus Störungswirkungen zu bestimmen, sind vollkommen gescheitert.

Nachdem Schiaparelli im Jahre 1866 auf die enge Verwandtschaft zwischen den größeren Meteorschauern und einigen Kometen hingewiesen hatte, sowie nach der klassischen Bestätigung der Theorie durch die stufenweise Auflösung des Bielaschen Kometen in einen Sternschnuppenschwarm glaubte man bereits der Lösung des Kometenrätsels sehr nahe zu sein. Tatsächlich ist nach jenen Feststellungen kaum eine andere Schlußfolgerung möglich, als daß die Kometen, zum mindesten ihre Kerne, aus Meteoren bestehen. Solange ein Komet noch teleskopisch erscheint und sich in größerem Abstande von der Sonne befindet, entspricht auch sein Aussehen durchaus dieser Annahme. Man braucht sich dann nur die Einzelteilchen in genügend großen Abständen vorzustellen, um auch die geringe Masse der Kometen verständlich zu finden. Die Veränderungen, die diese Gestirne bei größerer Annäherung an die Sonne erleiden, sind jedoch so elementar, so katastrophenartig, daß hier nur die sorgfältigste schrittweise Untersuchung aller vorkommenden Phänomene zum Ziele führen kann.

Photometrische Untersuchungen.

Beginnen wir mit der scheinbar einfachsten Erscheinung, der Lichtzunahme bei der Annäherung und der Lichtabnahme eines Kometen bei seiner Entfernung von Sonne und Erde, so stößt man schon hier auf eine große

Schwierigkeit, insofern, als sich der zuverlässigen Schätzung oder Messung eines helleren Kometen fast unüberwindliche Hindernisse in den Weg stellen. Während das Gestirn bei größerer Sonnenferne in kleinen Instrumenten oder mit freiem Auge nach seiner Gesamthelligkeit geschätzt wird, tritt in der Nähe der Sonne eine Differenzierung ein. Es entwickeln sich Kern, Haube und Schweif, und eine Vergleichung der älteren Helligkeitsangaben mit den neueren wird daher fast unmöglich gemacht. Nur für die kurze Zeitspanne, während der mindestens die Kern- und die volle Kopfhelligkeit getrennt meßbar sind, läßt sich zahlenmäßig entscheiden, ob der Komet uns in erster Linie eigenes oder von der Sonne entliehenes Licht zusendet. Daß bei hellen Kometen, die der Sonne sehr nahekommen, das Eigenlicht vorwiegt, beweist allerdings schon ihr hoher Glanz, während das Fehlen jeglicher Phase an ihren Kernen sich schon ganz natürlich aus der Zusammensetzung aus unzählbaren kleinen Partikeln erklären würde. Da reflektiertes Licht stets mehr oder weniger polarisiert ist, so könnten hier ähnlich wie bei der Sonnenkorona entsprechende Beobachtungen von Nutzen sein, besonders dann, wenn man das Auge durch die photographische Platte ersetzte. Versuche in dieser Richtung liegen bereits vor, doch haben sie bei der Lichtschwäche bzw. kurzen Sichtbarkeitsdauer der in letzter Zeit erschienenen Kometen keine neuen Gesichtspunkte zutage gefördert. Die im Planetensystem so wichtige Aufschlüsse ergebende Albedobestimmung findet jedenfalls in der Kometenastronomie ein völlig unfruchtbares Feld. Aus demselben Grunde ist es meist so gut wie unmöglich, für einen eben entdeckten und berechneten Kometen die künftige Gesamthelligkeit anders als näherungsweise durch Berücksichtigung des quadratischen Gesetzes für Sonnen- und Erdabstand anzugeben.

Kometenspektra.

Glücklicherweise hat die Anwendung der Spektralanalyse wesentlich günstigere Ergebnisse zu verzeichnen. Die erste spektroskopische Untersuchung eines Kometen ist bereits von Donati im Jahre 1864 ausgeführt worden. Es wurde dabei durch den italienischen Astronomen das Vorhandensein von drei auffälligen, nach dem Violett zu verwaschenen, hellen Bändern auf kontinuierlichem Grunde festgestellt. Die Beobachtungen der nächstfolgenden größeren Kometen bestätigten im wesentlichen das Resultat, und bereits im Jahre 1868 konnte Huggins die Identität dieser Bänder mit denen des Kohlenwasserstoffes nachweisen, dessen blaue Flamme in jedem Bunsenbrenner und in jedem Kerzenlicht zu finden ist. Die beiden an der Sonne besonders nahe vorübergegangenen glänzenden Kometen des Jahres 1882 haben dann noch die ersten Beispiele dafür geliefert, daß um die Perihelzeit unter teilweiser Zurückdrängung der Kohlenwasserstoffbänder auch die Natrium- und einige Eisenlinien im Kometenspektrum hell auftreten können. Durch alle diese Emissionsspektren ist somit das Selbstleuchten der Kometen unzweifelhaft bewiesen. Der kontinuierliche offenbar von der Sonnenbeleuchtung herrührende Hintergrund des Spektrums zeigt bei näherer Betrachtung gleichfalls einen beträchtlichen Wechsel, so daß die äußere

Veränderlichkeit der ganzen Klasse von Gestirnen sich auch am Spektrum deutlich offenbart.

Mit Hilfe der Photographie ist es in den letzten Jahren gelungen, die Untersuchung auch auf den unsichtbaren Teil des Spektrums und auf die Kometenschweife auszudehnen. Es sind dabei in Kernen und Schweifen merkwürdige Unterschiede gegen das normale Kohlenwasserstoffspektrum festgestellt worden, die auf Grund von Laboratoriumsversuchen teils durch die Beimengung von Kohlenoxyd und Cyan, teils durch den geringen Druck, unter dem besonders die Schweifmaterie leuchtet, ihre sehr wahrscheinliche Erklärung gefunden haben. Überhaupt muß hervorgehoben werden, daß die Nachbildung der meisten spektralen Kometenphänomene im Laboratorium merkwürdig rasch gelungen ist. Daß dabei in erster Linie elektrische Entladungen in Geißlerschen Röhren Vergleichsobjekte geliefert haben, wirft auf den um die Zeit stärkster Schweifentwicklung der Kometen beobachteten Leuchtprozeß ein unverkennbares Schlaglicht. Es kann heute kaum einem Zweifel unterliegen, daß den meisten kometarischen Phänomenen um die Perihelzeit kein eigentlicher Verbrennungsprozeß, sondern in erster Linie eine elektrische Leuchterscheinung zugrunde liegt. Die gewaltige Ausdehnung der Schweifmaterie, ihre fast unfaßbar dünne Verteilung u. a. m. verliert damit einen Teil des Rätselhaften, das ihm von alters her anhaftete.

Entstehung der Schweife.

Eine befriedigende, durch die Beobachtungen genügend begründete Theorie der Schweifbildung, des größten Kometenrätsels aller Zeiten, haben uns gleichfalls die letzten Jahrzehnte geliefert. Versuche, die mannigfache Gestalt der Schweife und ihre „Flucht vor der Sonne“ zu erklären, liegen freilich weit zurück. Schon Kepler dachte sich die Schweife als Ergebnis einer abstoßenden Kraft, die ihren Sitz in der Sonne habe, doch konnte erst Bessel nach den Beobachtungen am Kopfe des Halleyschen Kometen im Jahre 1835 eine erste Theorie für die Entstehung dieser seltsamen Gebilde aufstellen. Wohl das Wichtigste an den geistreichen Untersuchungen des Königsberger Astronomen war die unzweideutige Feststellung, daß die Schweife ihren Ursprung aus Ausströmungen des Kerns nehmen, und daß sie ihre Richtung einer in der Sonne zu suchenden Polarkraft verdanken. Während also der Kometenkern selbst im Sinne der Gravitation weitereilt, werden seine Ausströmungen teilweise entgegen dem Anziehungsgesetz in den Raum fortgeschleudert. Die materiellen Teilchen der Kernausströmungen unterliegen hier somit je nach ihrer Beschaffenheit zwei entgegengesetzten Kräften, von denen die eigentümliche Repulsivkraft meist die Oberhand behält.

Über die Natur dieser Repulsivkraft herrschte lange Zeit völliges Dunkel. Heute ist man wohl geneigt, die Schweifphänomene in erster Linie dem Strahlungsdruck zuzuschreiben, dessen Wirkung theoretisch durch Maxwell und experimentell durch Lebedeff, Nichols und Hull genauer untersucht worden ist. Seine Wirkung hängt von der Strahlungsenergie der Lichtquelle und von den Dimensionen der ihm unterliegenden materiellen Teilchen ab.

Letztere müssen, wenn die Repulsivkraft die Gravitationswirkung übertreffen soll, sehr klein sein, dürfen indessen die Grenzdurchmesser von 1,5 und 0,07 μ nach oben bzw. unten nicht überschreiten, wobei unter μ der tausendste Teil eines Millimeters zu verstehen ist. So winzig diese Teilchen auch sein mögen, gegenüber den Dimensionen der Gasmoleküle erscheinen sie selbst an der unteren Grenze noch als gewaltig groß. Ist somit die experimentell nachgewiesene und heute nicht mehr zu leugnende Lichtdruckerscheinung bei den Kometen tatsächlich wirksam, so hätte man in den Schweifen keine Gase, sondern überaus dünn verteilte diskrete Körperchen von wolken- oder rauchartiger Beschaffenheit zu vermuten.

Theorie von Bredichin.

Dieser Lichtdrucktheorie, die besonders in dem schwedischen Chemiker und Geophysiker Arrhenius einen begeisterten Verfechter gefunden hat, steht auch heute noch die wesentlich ältere Zöllnersche Auffassung gegenüber, die von einer elektrostatischen Ladung des Sonnenballes ausgeht und die Wirkung dieser Ladung auf die spektroskopisch in den Kometen nachgewiesenen Gase untersucht. Auf Grund der von Zöllner aufgestellten Theorie, daß die elektrische Abstoßung umgekehrt proportional dem Molekulargewicht eines Gases wirkt, hat Bredichin in den 70er und 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine große Zahl von Kometen auf die Ausdehnung und Gestalt ihrer Schweife genauer geprüft und hieraus Anhaltspunkte für ihre chemische Zusammensetzung und die Bewegung ihrer Materie zu gewinnen gesucht. Nach den Ergebnissen des russischen Astronomen lassen sich alle Kometenschweife in drei Typen eingliedern (Fig. 27). Beim ersten beträgt die Repulsivkraft rund das Achtzehnfache der Anziehung und erzeugt die geraden genau in der Verlängerung des Radiusvektors fortgeschleuderten dünnen Schweife. Beim zweiten wird die Attraktion schon erheblich schwieriger überwunden; die abstoßende Kraft wirkt hier kaum mit dem doppelten Betrage der Gravitation und schafft merklich hellere aber kürzere und deutlich gebogene Schweife. Der dritte Typus kommt schließlich zustande, wenn die Abstoßung nur $^1/_3$ bis $^1/_{10}$ der jeweiligen Gravitationswirkung beträgt, d. h. wenn die letztere nicht überwunden, sondern lediglich geschwächt erscheint. Hier ist nur die Entfaltung kurzer, breiter und dabei gebogener Schweife denkbar. Eine generelle Trennung der Typen ist nur bei schwächeren Kometen möglich; bei den großen Erscheinungen sind meist alle drei Schweif-

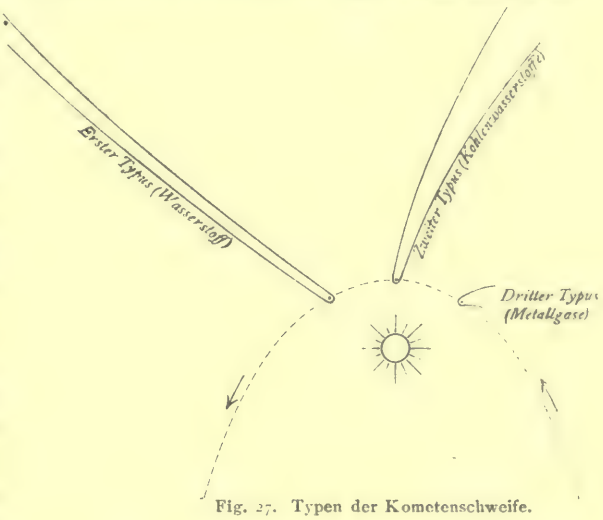


Fig. 27. Typen der Kometenschweife.

erscheinungen in mehr oder weniger ausgeprägter Form vertreten, ja es bilden sich dann zuweilen auch der Sonne zugekehrte Ausströmungen, die Bredichin als anomale Schweife bezeichnet, obwohl sie eigentlich richtiger als ungewöhnliche Verlängerungen der Kopfhaube aufzufassen sind. Nimmt man für die 2. Klasse entsprechend den spektroskopischen Erfahrungen Kohlenwasserstoffe an, so führt die Berechnung der Atomgewichte bei der 1. Klasse auf Wasserstoff, während beim 3. Typus schon Metallgase den Schweif bilden mögen.

Die Frage, ob die Voraussetzung von Lichtdruckkräften oder elektrostatischen Ladungen der Sonne den Vorzug verdient, ist angesichts der fast lückenlosen Darstellung aller beobachteten Phänomene durch beide Theorien schwer zu entscheiden. Die elektrische steht mit den spektroskopischen Untersuchungen besser im Einklang, zumal da bei Erhitzung von Meteorstücken — den einzig greifbaren Resten von Kometen — in luftverdünnten Röhren keine Dampf- oder Raucherscheinungen, sondern die für das Kometenspektrum charakteristische Entwicklung von Gasen, insbesondere von Kohlenoxyd und Kohlenwasserstoff eintritt. Diese Theorie geht indessen von einer hypothetischen, wenngleich recht wahrscheinlichen Energiequelle aus, der auf der anderen Seite die zweifellos nachgewiesene abstoßende Kraft der Strahlen der Sonne gegenübersteht. Man kann also gegenwärtig wohl die Schweife im großen und ganzen auf Grund einer gesetzmäßig wirkenden Repulsivkraft erklären, ist jedoch noch nicht imstande, das Wesen dieser Kraft bis in alle Einzelheiten zu verfolgen.

Ohne Zweifel bieten die Kometen, die verwandte Erscheinung der Sonnenkorona vielleicht ausgenommen, das interessanteste und vielseitigste Problem der kosmischen Physik dar. Wohl harrt noch so manches Rätsel, so mancher Widerspruch einer einwandfreien Deutung und Erklärung. Die bisherige so glückliche Anwendung der neuesten Errungenschaften der Physik auf die Kometen läßt jedoch von der künftigen Erkenntnis der im Schoße der Natur noch schlummernden Kräfte hier noch manches interessante Ergebnis in Gegenwart und Zukunft erhoffen.

Literatur.

Die physischen Eigentümlichkeiten des Mondes, der Planeten und Kometen werden in den meisten volkstümlichen Darstellungen der Himmelskunde, oft unter Zurücksetzung der anderen astronomischen Ergebnisse sehr erschöpfend behandelt. Von größeren Werken dieser Art seien erwähnt: NEWCOMB-ENGELMANN, Populäre Astronomie (letzte Aufl. 1914). Zuverlässigste, jedoch die Planetographie nicht in den Vordergrund rückende Darstellung der Ergebnisse astronomischer Forschung. In M. W. MEYER, Das Weltgebäude (letzte Aufl. 1908) sind die Planeten, der Mond und die Kometen recht erschöpfend und unter Beigabe von zum Teil vortrefflichen Illustrationen, jedoch nicht ohne gelegentliche phantastische und irreführende Ausblicke behandelt. KLEIN, Handbuch der allgemeinen Himmelsbeschreibung (1900) ist weniger verbreitet, aber durch die zahlreichen Literaturnachweise wertvoll. Auch die Himmelskunde von PLASSMANN (Freiburg, 1913) und Der Sternenhimmel von PLASSMANN und POHLE, ersteres mehr didaktisch, letzteres populärer mit zum Teil historisch interessanten Abbildungen, sind zu empfehlen.

Für die Geschichte der Mond-, Planeten- und Kometenforschung erweisen sich von besonderem Wert die Notizen in WOLF, Geschichte der Astronomie (1877), die auf knappem Raum oft mehr und zuverlässigere Angaben enthalten als MÄDLER, Geschichte der Himmelskunde von der ältesten bis auf die neueste Zeit (1873). Die Ergebnisse des vergangenen Jahrhunderts behandelt CLERKE, Geschichte der Astronomie während des 19. Jahrhunderts (1889). Als Quelle für historische Angaben zahlreicher populärer Bücher haben A. von HUMBOLDTs Kosmos und ARAGOs populäre Astronomie gedient.

Wissenschaftliche Zusammenstellungen der rein astrophysikalischen Forschungsmethoden und Resultate geben die von Potsdamer Astronomen verfaßten Fundamentalwerke: MÜLLER, Photometrie der Gestirne (1897), SCHEINER, Spektralanalyse der Gestirne (1890) und desselben Verfassers Photographie der Gestirne (1897), doch sind die beiden letzten in bezug auf die Planeten und Kometen bereits veraltet. Sehr ausführliche Literaturnachweise geben den drei Werken einen besonderen Wert.

In neuerer Zeit sind spezielle Darstellungen der planetographischen Ergebnisse erschienen. PETER, Die Planeten (1909) enthält in knapper, gedrängter Form fast alles Wissenswerte aus diesem Zweig der Himmelskunde, während wir in ANDRÉ, Les planètes et leur origine (1909) eine ausführliche und sehr vollständige Planetographie besitzen. LOHSE, Planetographie (1894) wendet sich mehr an den Beobachter und geht auch auf Messungen an Planetenscheiben und verwandte Aufgaben ein. Im Gegensatz zu diesen drei sehr sachlich gehaltenen Werken findet man in ARRHENIUS, Das Schicksal der Planeten (1911) einige geistreiche, aber durchaus hypothetische Ausblicke auf die Entwicklungsgeschichte der Schwesterwelten der Erde.

Abgesehen von Mars sind Einzeldarstellungen der Planeten verhältnismäßig selten. SCHRÖTER, Hermographische Fragmente (1816) mag als einziges Beispiel einer Merkurmonographie genannt sein. Im Zusammenhange mit den vergeblichen Versuchen einer Rotationsbestimmung der Venus erscheinen von historischem Interesse BLANCHINUS, Hesperi et Phosphori nova Phaenomena (1728), ferner SCHRÖTER, Beobachtungen über die sehr beträchtlichen Gebirge und die Rotation der Venus (1793), sowie desselben Verfassers Aphroditographische Fragmente (1796). Für die Gleichheit von Rotation und Revolution des Planeten tritt SCHIAPARELLI in Considerazioni sul moto rotatorio del pianeta Venere (1890) ein. Aus der umfangreichen Literatur über Mars kann nur eine kurze Auswahl mitgeteilt werden, mit

um so größerer Berechtigung, als das zweibändige Werk von FLAMMARION, La planète Mars et ses conditions d'habitalité (1892 und 1909) jede Opposition, aus der Beobachtungen vorliegen, sehr eingehend behandelt und die Mitteilungen der Beobachter oft im Wortlaut zitiert. Der Unterschied zwischen den älteren und neueren Ergebnissen der Marsbeobachtung kann kaum besser veranschaulicht werden als durch einen Vergleich der beiden umfangreichen Serien von Zeichnungen und Beschreibungen, die die Literatur in SCHRÖTER, Areographische Beiträge zur genaueren Kenntnis des Planeten Mars (erst 1881 erschienen) und in SCHIAPARELLI, Osservationi astronomiche e fisiche sull' asse di rotatione e sulla topografia del pianeta Marte (7 Abh. 1878—1910) besitzt. Die unerschütterliche Auffassung LOWELLS über die Bewohnbarkeit des Mars findet ihren Ausdruck in LOWELL, Mars (1896) und desselben Autors Mars as the abode of Life (1908). Als Muster einer Rotationsbestimmung eines Planeten aus dem vorhandenen Beobachtungsmaterial kann WISLICENUS, Beitrag zur Bestimmung der Rotationszeit des Planeten Mars (1886) dienen.

Die veränderlichen Oberflächengebilde des Jupiter verhindern eine summarische Darstellung nach Art der Flammarionschen Marsmonographie, und Saturn, Uranus und Neptun kommen in dieser Beziehung erst recht nicht in Frage. Ein Beispiel der Bearbeitung einer größeren, fast drei Jahrzehnte umfassenden Reihe von Beobachtungen hat LOHSE in seinen Untersuchungen über die physische Beschaffenheit des Planeten Jupiter (1911) gegeben. SCHRÖTERS Kronographische Fragmente (1808) stellen den einzigen älteren Versuch einer Saturnmonographie dar. Späterhin konzentriert sich die Literatur in erster Linie auf das Ringphänomen, dessen feste Struktur durch MAXWELL, Essay on the stability of the motion of Saturns rings (1859) zum erstenmal als theoretisch unhaltbar nachgewiesen wird. Die SEELIGERsche Theorie des Ringes ist in MÜLLER, Photometrie der Gestirne (1897) aus den Abhandl. der K. Bayr. Akad. der Wiss. ausführlich mitgeteilt. Eine sehr lesenswerte populäre Darstellung des ganzen Problems findet sich in DARWIN, Ebbe und Flut (1902). Über den ersten spektrographischen Nachweis der meteorischen Konstitution des Ringsystems durch KEELER und DESLANDRES ist in Zeitschriften, insbesondere in den ersten Bänden des Astrophysical Journal berichtet.

Eine kurze populäre Mondkunde liegt in FRANZ, Der Mond (1906) vor. Sie behandelt auch die kosmischen Verhältnisse des Erdtrabanten, kann indessen auf dem knapp bemessenen Raum kaum mehr als eine Übersicht geben. Weit ausführlicher, jedoch veraltet ist das klassische Werk von BEER und MÄDLER, Der Mond nach seinen kosmischen und individuellen Verhältnissen (1837). Lediglich die Topographie behandeln ELGER, The Moon (1895) und NEISON, Der Mond (1878); beide sind mit sehr brauchbaren Karten ausgestattet. Von den älteren Selenographien seien HEVELIUS, Selenographia sive lunae descriptio (1647) und SCHRÖTER, Selenographische Fragmente (1791 und 1802) genannt, die heute lediglich noch historisches Interesse beanspruchen können. Die ausführlichste Zeichnung des Mondes nach direkten Beobachtungen hat SCHMIDT in seiner Charte der Gebirge des Mondes (1878) geliefert, während das photographisch Erreichbare in LOEWY und PUISEUX, Atlas photographique de la lune (1896—1910) und dem zugehörigen Text niedergelegt ist. Vortreffliche Stereoskopbilder des Mondes sind von HARTMANN, M. WOLF, LE MORVAN u. a. aufgenommen worden. Um die exakte Ausmessung der Mondoberfläche haben sich in letzter Zeit besonders FRANZ, HAYN und SAUNDER verdient gemacht.

Von geologischem Standpunkte ist der Mond nicht allzu oft behandelt worden. NASMYTH und CARPENTER, Der Mond als Planet, Welt und Trabant (1906) versuchen eine vulkanische Deutung der Ringgebirge, während in GÜNTHER, Vergleichende Mond- und Erdkunde (1911) unter reichlichem Literaturnachweis auch andere geologische Kräfte herangezogen werden. Sehr beachtenswert in dieser Beziehung ist auch die kleine Abhandlung des Geologen SUESS, Einige Bemerkungen über den Mond (1895). Die kosmogonische Stellung des Mondes hat in geistreicher und lichtvoller Darstellung DARWIN in seinem bereits oben erwähnten Werk Ebbe und Flut behandelt.

Das Interesse früherer Jahrhunderte für die Kometen spiegelt sich in zahllosen Kometographien wider, unter denen diejenigen von HEVELIUS (Cometographia 1668) und LUBIE-

NIECKI (Theatrum Cometicum 1681) wohl die berühmtesten sind. Alle erreichbaren Angaben über ältere Kometenerscheinungen hat dann PINGRÉ in seiner wertvollen zweibändigen Cométographie (1783) unter Angabe der Quellen zusammengestellt. Als eine kritische Kometographie in neuzeitlichem Sinne können HOLETSCHEKs Untersuchungen über die Größe und Helligkeit der Kometen und ihrer Schweife (1896 ff.) gelten. Unter den populären Kometenmonographien ist CHAMBERS, The Story of the Comets (1909) wohl an erster Stelle zu nennen. Die elektrische Theorie der Schweifphänomene ist enthalten in ZÖLLNER, Über die Natur der Kometen (1872). Ihre erfolgreiche Ausbildung hat dann BREDICHIN in seinen umfangreichen Recherches sur les queues de comètes (Moskauer Ann. Bd. I u. ff.) und in der Schrift Über Kometenschweife (1862, russisch) durchgeführt. In ARRHENIUS, Werden der Welten (1908) und RIGHI, Kometen und Elektronen (1911) wird die Lichtdruck- bzw. Elektronentheorie in ihrer Anwendung auf die Kometen in allgemeinverständlicher Darstellung behandelt.

Ein Studium der physischen Verhältnisse des Planetensystems, der Kometen usw. ist neuerdings ohne Berücksichtigung der Zeitschriften kaum denkbar. Das Astrophysical Journal, die Monthly Notices der Royal Astronomical Society und, soweit populäre Orientierung in Frage kommt, das Bulletin de la Société astronomique de France berichten zwar über die meisten neuen Errungenschaften auf dem in Frage kommenden Gebiet, in Spezialfragen muß indessen auf die jährlichen Literaturzusammenstellungen des von WISLICENUS begründeten Astronomischen Jahresberichts (seit 1899) verwiesen werden.

PHYSIK DER SONNE.

Von

E. Pringsheim.

Die Sonne als Fixstern.

I. Ergebnisse der direkten Beobachtung. Vom allgemeinsten, kosmischen Standpunkte betrachtet ist die Sonne nur ein einzelner unter ungezählten Millionen von Sternen, weder durch besondere Größe noch durch andere hervorstechende Eigenschaften vor ihren Genossen ausgezeichnet. Aber wie erhaben dieser Standpunkt auch sein mag und wie notwendig, wenn wir von der uns angeborenen anthropozentrischen Anschauung zu einem möglichst objektiven Weltbild vordringen wollen, der Forscher ist doch an den Platz im Weltall gebunden, an den ihn das Schicksal gestellt hat, und so ist die Sonne, wie sie die Quelle alles Lebens für die Erde und ihre Bewohner darstellt, auch für die Astronomie und die Astrophysik von einer alle anderen Sterne weit überragenden Bedeutung. Denn während alle anderen Fixsterne so weltenweit von uns entfernt sind, daß sie uns nur als Lichtpunkte erscheinen, und daß es unmöglich wäre, Planetensysteme zu beobachten, die sie umkreisen, so stellen die Planeten der Sonne, zu denen ja unsere Mutter Erde selbst gehört, mit die hellsten Sterne unseres Himmels dar, und die Sonne selbst erblicken wir nicht als einen Punkt, sondern als eine ausgedehnte Scheibe, auf der wir örtlich getrennte Objekte und Vorgänge wahrzunehmen und zu studieren vermögen.

Die Entfernung Sonne-Erde als astronomische Einheit.

Die erste Frage, die bei der Erforschung der Sonne uns entgegentritt, ist die nach dem Maßstab, den wir den beobachteten Erscheinungen zugrunde zu legen haben. Wir müssen uns klar werden über die Größenordnung der Sonne und der auf ihr sichtbaren Objekte. Zu diesem Zwecke ist es vor allem nötig, die Distanz zu kennen, die uns von dem Gegenstande unserer Beobachtung trennt, also die Entfernung der Sonne von der Erde. Auf die Messung dieser Größe ist im Laufe der Zeiten eine ungeheure Summe von Arbeit verwandt worden. Hat man doch eben diese Distanz als eine fundamentale Konstante in die messende Astronomie eingeführt, als den Maßstab, den man zur Einheit für die Messung aller kosmischen Entfernungen benutzt, und man nennt sie daher die „astronomische Einheit“. Und wie man sich für alle Zwecke der Praxis und der Wissenschaft bemüht hat, den allen irdischen Längenmessungen zugrunde liegenden Maßstab, das Meter, so genau wie irgend möglich festzulegen, so ist es für die Astronomie von

der allergrößten Wichtigkeit, die Länge ihres Urmaßes mit aller erreichbaren Genauigkeit festzustellen, d. h. in den irdischen Einheiten des Metermaßes auszudrücken.

Sonnenparallaxe.

Schon an einer früheren Stelle dieses Werkes (S. 202) wurde der Begriff der Parallaxe erläutert, und dort wurden auch die Bemühungen des Altertums besprochen, die Sonnenparallaxe und hiermit die Entfernung der Sonne zu ermitteln. Wir sahen dort, daß bis in das 17. Jahrhundert für die Sonnenparallaxe der schon von Aristarch angegebene Wert von 3′ Geltung behielt, aus dem sich der Abstand der Sonne von der Erde zu 1150 Erdradien berechnete. Erst durch die Erfindung des Fernrohrs wurde die in Wirklichkeit noch nicht 9″ betragende Sonnenparallaxe in den Bereich der Meßbarkeit gerückt, aber auch so wäre ihre Messung noch kaum geglückt, wenn die Astronomen nicht einen ganz besonderen Kunstgriff angewendet hätten. Wollte man nämlich die Sonnenparallaxe aus der im Laufe eines Tages zu beobachtenden geringfügigen Verschiebung der Sonne nach demselben Verfahren berechnen, welches Ptolemäus (vgl. S. 206) zur Bestimmung der Mondparallaxe anwandte, so würden selbst die heutigen vollendeten Meßinstrumente nur die Ermittlung eines ganz rohen Näherungswertes erlauben. Denn die direkte Messung der Stellung eines Gestirns am Himmel, die sogenannte absolute Ortsbestimmung, wie sie auch Ptolemäus ausführte, ist zur Messung so kleiner Unterschiede nicht genau genug, und hierzu kommen bei Beobachtungen an der Sonne noch die großen Störungen durch die Erhitzung des von der Sonne bestrahlten Instruments, Änderungen der Refraktion und Luftunruhe. Alle diese Schwierigkeiten werden beseitigt, indem man nicht die Parallaxe der Sonne selbst, sondern die eines uns möglichst nahe stehenden Planeten mißt. Nach den Keplerschen Gesetzen sind die Verhältnisse aller Entfernungen im Planetensystem zueinander bekannt, und wenn es daher gelingt, irgendeine dieser Entfernungen linear auszumessen, so sind damit sofort auch alle anderen Distanzen, folglich auch die Sonnenparallaxe, gefunden.

Aus Planetenentfernungen.

Da die Messung einer Parallaxe um so leichter und genauer auszuführen ist, je näher uns der beobachtete Himmelskörper steht, so wird man zur direkten Parallaxenbestimmung nur die uns am nächsten kommenden Planeten auswählen, also von den unteren Planeten Venus, von den oberen Mars und einige geeignete kleine Planeten. In der Tat beträgt der Abstand der Venus von der Erde zur Zeit eines Venusdurchganges (S. 264) im günstigsten Falle nur 0,26, der des Mars bei einer günstigen Opposition 0,38 und der des kleinen Planeten Eros sogar nur 0,15 der Sonnenentfernung, so daß dann die Parallaxen dieser Planeten rund das Vier-, Drei- bzw. Siebenfache der Sonnenparallaxe betragen. Aber nicht in dieser Vergrößerung des zu messenden Betrages liegt der Hauptvorteil der Planetenbeobachtungen, sondern darin, daß die beobachteten Planeten dicht neben anderen Himmelskörpern sichtbar sind — die oberen Planeten am Nachthimmel zwischen den Fixsternen, Venus zur Zeit des Durchganges auf der Sonnenscheibe selbst —,

denen gegenüber ihre relative Stellung am Himmel mit beinahe hundertfach größerer Genauigkeit gemessen werden kann als der oben erwähnte absolute Ort. Ein Venusdurchgang kann sich nur ereignen, wenn Venus zur Zeit der unteren Konjunktion sich ganz in der Nähe eines Knotens ihrer Bahn befindet; so ergeben sich in 243 Jahren je vier Venusdurchgänge:

1631 Dezember 6	1874 Dezember 9
1639 Dezember 4	1882 Dezember 6
1761 Juni 6	2004 Juni 8
1769 Juni 3	2012 Juni 6 usw.

Den ersten Vorschlag, die Venusdurchgänge in dieser Weise zur Messung der Venus- bzw. Sonnenparallaxe zu benutzen, machte Halley im Jahre 1691. Zur Beobachtung der vier seit jener Zeit eingetretenen Durchgänge haben die Astronomen aller Nationen nach weit über die ganze Erde verteilten Stationen Venusexpeditionen unternommen, die ein sehr reichhaltiges Messungsmaterial ergeben haben. Jedoch sind die Beobachtungen auf große, unerwartete Schwierigkeiten gestoßen, und die Genauigkeit des aus ihnen ermittelten Wertes der Sonnenparallaxe entspricht nicht ganz dem großen Aufwande von Geld, Zeit und Mühe.

Von den Marsoppositionen sind besonders die der Jahre 1862, 1877 und 1892 eifrig beobachtet worden. Aber noch besser als Mars eignen sich für diese Messungen die kleinen Planeten, weil sie im Fernrohr punktförmig wie die Fixsterne erscheinen und daher schärfer als die Marsscheibe einzustellen sind. Hierauf wies zuerst J. G. Galle hin, und es wurden in der Folge besonders die Oppositionen von Flora (1873), von Iris (1888) sowie Victoria und Sappho (1889) beobachtet. Alle diese Planeten wurden aber weit in den Hintergrund gedrängt, als G. Witt in Berlin im Jahre 1898 den kleinen Planeten Eros entdeckte, dessen Parallaxe bis auf etwa eine Bogenminute steigen kann. Aus der noch nicht sehr günstigen, an vielen Sternwarten beobachteten Erosopposition im Winter 1900/01 hat Hinks die Sonnenparallaxe 8,806″ abgeleitet. Zweifellos wird künftig die umfassende Beobachtung günstiger Erosoppositionen — die nächste findet 1931 statt — eines der besten Mittel zur genauen Bestimmung der Sonnenparallaxe sein.

Aber die moderne Astronomie verfügt zum Glück noch über eine ganze Anzahl anderer ebenfalls sehr zuverlässiger Methoden, um eine so wichtige Fundamentalkonstante, wie die Sonnenparallaxe, zu bestimmen. In Kürze mögen die wichtigsten hier erwähnt werden.

Aus der Bewegung des Mondes.

Aus den mechanischen Gesetzen der Bewegung des Mondes ergeben sich zwei verschiedene Mittel zur Bestimmung der Sonnenparallaxe. Erde und Mond beschreiben gleichzeitig um den auf ihrer Verbindungslinie liegenden Schwerpunkt des Systems Erde-Mond einander ähnliche Ellipsen, deren Dimensionen sich umgekehrt verhalten wie die Massen der beiden Himmelskörper. Diese monatliche Bewegung der Erde spiegelt sich — wie ja die Bewegung der Erde überhaupt — in einer scheinbaren Bewegung der Sonne, der sogenannten „lunaren Gleichung“ wider, die aus Sonnen-

beobachtungen ermittelt werden kann. Ferner wird die Bewegung des Mondes um die Erde in hohem Grade durch die Anziehung der Sonne beeinflußt oder „gestört", wie der Astronom sagt. Der Betrag dieser „parallaktischen Gleichung" der Mondbewegung läßt sich aus Mondbeobachtungen ermitteln. Sowohl aus der lunaren wie aus der parallaktischen Gleichung läßt sich das Verhältnis der Entfernung der Sonne zu der des Mondes berechnen, und da letztere sehr genau bekannt ist, so ist damit die Sonnenentfernung gegeben.

Aus der Lichtgeschwindigkeit.

Eine andere Gruppe von Methoden ist noch mehr physikalischer Natur. Von besonderem Interesse nicht nur wegen ihrer Genauigkeit, sondern auch als Zeugnis für die historische Entwicklung der Wechselwirkung zwischen Astronomie und Physik ist die Bestimmung der Sonnenparallaxe aus der Lichtgeschwindigkeit. Im Jahre 1675 machte Olaf Römer die Beobachtung, daß die Verfinsterungen der Jupitermonde nicht mit der Regelmäßigkeit eintraten, die man von solchen kosmischen Vorgängen erwarten muß. Er zog daraus den genialen Schluß, daß das Licht, welches uns von diesen Verfinsterungen Kunde bringt, zu seiner Reise durch den Weltenraum Zeit gebraucht, und daß diese Zeit bei den verschiedenen Verfinsterungen deshalb verschieden lang ist, weil die Entfernung zwischen dem Jupiter und der Erde, und zwar hauptsächlich infolge der Bewegung der Erde um die Sonne, wechselt. So konnte er die „Lichtzeit" messen, d. h. die Zeit, welche das Licht braucht, um die mittlere Halbachse der Erdbahn, also die Entfernung Sonne—Erde, zu durcheilen. Da diese Entfernung schon damals ungefähr bekannt war, so konnte Römer die Geschwindigkeit berechnen, mit welcher das Licht sich durch den Raum fortpflanzt. Er kam zu dem Resultat, daß die Lichtgeschwindigkeit 42 000 Meilen in der Sekunde betrage. Das war eine überraschende physikalische Entdeckung, und Olaf Römer schenkte damit, ausgehend von rein astronomischen Betrachtungen, der Physik nicht nur die fundamentale Erkenntnis, daß das Licht zu seiner Ausbreitung Zeit braucht, sondern auch eine der wichtigsten Konstanten, die wir kennen. Seitdem haben sich die Verhältnisse wesentlich geändert. Es ist gelungen, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes auf rein physikalischem Wege zu messen. Das gelang zuerst Fizeau (1849), seitdem noch einer größeren Zahl von Beobachtern nach wesentlich verschiedenen Methoden. Als Gesamtresultat ergibt sich, daß die Lichtgeschwindigkeit fast genau 300000 km pro Sekunde beträgt. Diese Zahl ist mit einer so großen Genauigkeit gegeben, daß wir jetzt die Römersche Methode in umgekehrter Richtung verfolgen können. Wir schließen nicht mehr aus der als bekannt angenommenen Länge des Erdbahnradius auf die Lichtgeschwindigkeit, sondern können aus der bekannten Lichtgeschwindigkeit durch Messung der Lichtzeit oder auch durch Messung der Aberration die Länge des Halbmessers der Erdbahn berechnen.

Eine zweite vorzügliche astrophysikalische Methode beruht auf dem Dopplerschen Prinzip, von dem weiter unten (S. 353) noch eingehender die

Rede ist. Messungen an den Spektren der Fixsterne gestatten uns, mit Hilfe des bekannten Wertes der Lichtgeschwindigkeit die Abstandsänderung zwischen der Erde und dem beobachteten Stern, also die relative Geschwindigkeit der Erde gegenüber dem Sterne, zu berechnen. Ist die räumliche Geschwindigkeit des Sternes konstant, so rührt die im Laufe eines Jahres beobachtete Schwankung der relativen Geschwindigkeit allein von der Bewegung der Erde selbst her. Die Messungen ergeben daher die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn, ausgedrückt in Kilometern pro Sekunde. Andererseits ist uns durch die auf den Keplerschen Gesetzen aufgebaute Theorie der Bewegung die Erdgeschwindigkeit in astronomischen Einheiten gegeben, und hiermit ist also wieder das Verhältnis der astronomischen Einheit zum irdischen Längenmaß, d. h. die Sonnenparallaxe, gefunden. Eine erste Anwendung dieser Methode machte Küstner in Bonn im Jahre 1905, eine ausgedehntere Beobachtungsreihe wurde sodann auf der Capsternwarte ausgeführt und lieferte einen sehr zuverlässigen Wert der Sonnenparallaxe.

Aus der Fallgeschwindigkeit.

Eine dritte physikalische Methode, die von Leverrier herrührt, beruht auf dem Vergleich der Fallgeschwindigkeit auf der Erde und der Fallgeschwindigkeit der Erde selbst gegen die Sonne. Wenn die relativen Massen der Sonne und der Erde bekannt sind, kann man daraus die Entfernung Erde—Sonne bestimmen.

Zusammenstellung.

Alle diese ganz verschiedenen Methoden haben zu außerordentlich nahe übereinstimmenden Werten der Sonnenparallaxe geführt, wie die folgende kleine Zusammenstellung zeigt:

Venusdurchgänge 1874 und 1882, Kontaktbeobachtungen	8,79″
„ „ „ „ andere Messungen	8,86
Marsopposition 1877	8,78
Erosopposition 1900/01	8,81
Oppositionen anderer kleiner Planeten	8,80
Lunare Gleichung der Sonnenbewegung	8,82
Parallaktische Gleichung der Mondbewegung	8,79
Lichtgeschwindigkeit und Lichtzeit	8,80
Dopplersche Geschwindigkeitsmessung an Sternspektren	8,80

Um die für alle astronomischen Berechnungen notwendige Einheitlichkeit zu erzielen, beschloß eine internationale Kommission, die im Mai 1896 in Paris tagte, als Wert der Sonnenparallaxe

$$p_\odot = 8{,}80''$$

anzunehmen, und man erkennt auch schon aus obiger Liste, daß diese Zahl kaum noch um 0,01″ unsicher sein kann.

Daraus folgt für die Entfernung Sonne—Erde der Wert:

$$R = 149\,500\,000 \text{ km} \pm 170\,000 \text{ km}.$$

Diese Zahl stellt die mittlere Entfernung zwischen Sonne und Erde dar. Im Laufe des Jahres wechselt diese Entfernung, da die Erdbahn kein Kreis,

sondern eine Ellipse ist. In der Sonnennähe (Perihel) am 1. Januar ist die Entfernung ungefähr um 2 500 000 km geringer, in der Sonnenferne (Aphel) der Erde am 3. Juli ebensoviel größer als die mittlere Entfernung.

Dimensionen der Sonne.

Wenn wir die Entfernung Sonne—Erde kennen, so ist es leicht, die Dimensionen der Sonne zu bestimmen. Die Sonne erscheint uns als eine helleuchtende kreisförmige Scheibe. Ihre „scheinbare Größe", d. h. der Winkel, unter dem uns der Durchmesser der Sonne erscheint, beträgt nach genauen Messungen zur Zeit des Perihels 32′31″, zur Zeit des Aphels 31′27″ und in der mittleren Entfernung 31′59,3″, der mittlere scheinbare Radius der Sonne ist also gleich 959,6″. Merkwürdigerweise hat sich dabei zwischen den in verschiedener Richtung liegenden Radien trotz der sorgfältigsten Untersuchung kein Unterschied ergeben. Der Durchmesser an den Polen scheint genau ebenso groß zu sein wie der am Äquator. Eine Abplattung, wie sie die Erde zeigt, ist auf der Sonne nicht zu bemerken. Aus der scheinbaren Größe ergibt sich der Halbmesser der Sonne zu 695 450 km. Da der Erdradius 6377,4 km beträgt, so verhält sich der Sonnenradius zum Erdradius wie 109 : 1. Die Entfernung des Mondes von der Erde beträgt 384 000 km. Denken wir uns also die Erde in die Sonne hineinverlegt, so daß die Mittelpunkte beider zusammenfallen, so würde der Mond mit seiner ganzen Bahn noch innerhalb des Sonnenkörpers liegen, und zwar ziemlich in der Mitte zwischen Zentrum und Oberfläche der Sonne. Denken wir uns die Erde durch eine kleine Kugel von 10 cm Durchmesser dargestellt, so müßte eine im gleichen Maßstabe ausgeführte Sonnenkugel einen Durchmesser von 11 m besitzen, und wenn wir auch die Entfernung zwischen Sonne und Erde im selben Maßstabe zur Darstellung bringen wollten, müßten wir beide Kugeln in einer Entfernung von 1200 m voneinander aufstellen. Die Oberfläche der Sonne berechnet sich zu 6,08 Billionen qkm oder 12000 mal so groß wie die Erdoberfläche, ihr Volumen zu 1,41 Trillionen cbkm oder 1 300000 mal so groß wie das Volumen der Erde.

Masse und mittlere Dichte

Aus der Anziehungskraft, welche die Sonne auf die Erde ausübt und die aus der Bewegung der Erde um die Sonne leicht zu berechnen ist, folgt mit Hilfe des Newtonschen Gravitationsgesetzes das Verhältnis der Sonnenmasse zu der Erdmasse. Beide Massen verhalten sich wie 330000 : 1; daher ergibt sich für die Masse der Sonne die ungeheure Zahl von 1940 Quadrillionen Tonnen (1 t = 1000 kg). Da sich die Volumina wie 1 300000 : 1 verhalten, so folgt, daß die mittlere Dichte der Sonne nur etwa $\frac{1}{4}$ so groß ist wie die der Erde. Demnach würde also in 1 cbm der Sonne nur etwa der vierte Teil der Masse enthalten sein, die sich in 1 cbm der Erde findet. Da die mittlere Dichte der Erde bezogen auf Wasser ungefähr 5,5 ist, so wäre die mittlere Dichte der Sonne, in der gleichen Einheit gemessen, etwa 1,4. Endlich findet man leicht, daß die Fallbeschleunigung auf der Sonne 27,5 mal so groß ist wie auf der Erde. Hier fällt ein Körper in der ersten Sekunde etwa 5 m, auf der Sonne würde er also in der ersten Sekunde ungefähr 137 m fallen.

Maßstab der Sonnenphänomene.

Von besonderer Wichtigkeit ist es, daß wir uns über die Größe der Erscheinungen Rechenschaft geben, die wir auf der Sonne wahrnehmen. Die Sonne ist schwerer zu beobachten als andere Objekte am Himmel, schon wegen der lebhaften Unruhe, die die von ihr ausgehende gewaltige Wärmestrahlung in der Erdatmosphäre hervorbringt. Auch mit dem besten Fernrohr und unter den günstigsten atmosphärischen Bedingungen können wir kaum zur genauen Abbildung von Größen auf der Sonne kommen, die unter einem kleineren Winkel erscheinen als etwa 1″. Das entspricht bei senkrechter Sehrichtung, also in der Mitte der Sonnenscheibe, einer Ausdehnung von etwa 725 km. Objekte also, die eine geringere Ausdehnung besitzen als etwa den zehnten Teil des Erdradius, können wir auf der Sonne jedenfalls nicht mit Sicherheit und nur unter ganz besonders günstigen Umständen beobachten, und Erscheinungen, die auf der Sonne eben noch an der Grenze des Wahrnehmbaren liegen, würden uns auf der Erde schon als riesengroß vorkommen. Wir müssen also an die Heliographie mit einem ganz anderen Maßstabe herantreten als an die Geographie, wir können nicht verlangen, die Oberfläche der Sonne etwa mit der Genauigkeit darzustellen, die wir von unsern Generalstabskarten zu fordern gewöhnt sind, sondern wir müssen uns damit bescheiden, nur die allerauffallendsten Dinge in ganz groben Zügen zu erforschen. Freilich ist auf der Sonne an solchen sehr auffallenden Objekten von riesiger Ausdehnung kein Mangel, und es ist dafür gesorgt, daß der Sonnenforschung trotz ihrer beschränkten Beobachtungskraft das Material so bald nicht ausgehen wird.

Ältere Beobachtungen.

Wenden wir uns nun der Beobachtung der Sonne selbst zu. Wenn wir unsere Augen auf die Sonne richten, um sie zu erforschen, so machen wir dieselbe unangenehme Erfahrung wie Goethes Faust. Sehnsüchtig harrt er dem Aufgange der Sonne entgegen; als sie endlich erscheint, blickt er begeistert nach ihr hin und ruft aus:

„Sie tritt hervor! — Und leider! schon geblendet
Kehr' ich mich weg, vom Augenschmerz durchdrungen."

Der Glanz des Sonnenlichtes ist so gewaltig, daß unsere nicht für die Sonnenbeobachtung, sondern für die Betrachtung der alltäglichen Dinge des Lebens eingerichteten Augen ihn nicht zu ertragen vermögen. Diese brutale Tatsache ist schuld, daß uns aus alten Zeiten über die Vorgänge auf der Sonne so gut wie gar keine Berichte vorliegen. Obwohl auf ihr häufig Flecke von solcher Ausdehnung erscheinen, daß sie mit bloßem Auge wahrnehmbar sind, so sind uns aus alter Zeit nur ganz vereinzelte Beobachtungen darüber bekannt geworden, die bei tiefem Sonnenstande angestellt worden sind, wenn zufällig eine ziemlich dichte, aber gleichmäßige Dunstschicht die stark blendende Kraft der Sonnenstrahlung milderte. Eine solche Beobachtung stammt aus dem Jahre 807, eine andere aus dem Jahre 1588. Man hielt diese Flecke damals für Planeten, die an der Sonnenscheibe vorübergingen.

Fernrohrbeobachtung.

Erst als die Fernrohre in Aufnahme kamen, wurden die Sonnenflecke nahe gleichzeitig von Johann Fabricius, von Galilei und von Christoph Schei-

ner entdeckt. Auch Galilei, der 1610 im Garten der Villa Bandini in Rom beobachtete, hielt die Flecke noch für Planeten und zeigte die Erscheinung seinen Freunden, wenn das allzugrelle Sonnenlicht durch eine gleichmäßige Wolken- oder Nebelschicht gemildert war. Zu einer systematischen Beobachtung wurde er erst angeregt, als der Jesuitenpater Christoph Scheiner in Ingolstadt die Flecke genauer studierte und wichtige Einzelheiten an ihnen erkannt hatte. Auch Scheiner hielt sie für planetarische Körper, und erst Galilei erkannte bei seinen neuen Untersuchungen, daß es sich um solare Erscheinungen handle. Er stellte schon ihre Bewegung fest und schloß daraus auf die Umdrehung der Sonne um ihre Achse.

Subjektive, objektive und photographische Methode.

Auch bei der Fernrohrbeobachtung liegt die Hauptschwierigkeit darin, den ungeheuren Glanz des Sonnenlichts auf ein erträgliches Maß herabzudrücken. So soll die häufige Beobachtung der Sonne ohne geeigneten Augenschutz die Ursache von Galileis späterer Erblindung gewesen sein. Das Problem der Lichtschwächung für die teleskopische Sonnenbeobachtung hat man auf verschiedene Weise zu lösen gesucht. Für die direkte Beobachtung bildet die beste Lösung das helioskopische Okular, in welchem das ins Auge gelangende Licht durch Reflexion polarisiert wird und mit Hilfe eines Analysators in jedem beliebigen Grade geschwächt werden kann. Noch gefahrloser für das Auge ist die schon von Scheiner angewandte Projektion des vergrößerten Sonnenbildes auf einen hinter dem Fernrohr angebrachten weißen Schirm; man bezeichnet diese als die objektive Beobachtungsmethode. Setzt man an die Stelle des Auffangschirmes die photographische Platte, so erhält man das photographische Verfahren, das seine höchste Vollendung in den weiter unten besprochenen heliographischen Aufnahmen gefunden hat. Die großen Vorzüge dieser Methode liegen auf der Hand. Wenn die Einrichtungen dafür einmal getroffen sind, gehen die Aufnahmen sehr rasch und bequem vonstatten, man kann daher jeden kurzen Sonnenblick benutzen und ist sehr viel weniger vom Wetter abhängig als bei der subjektiven Beobachtung. Das so gewonnene Bild kann man später in aller Ruhe untersuchen. Dazu kommt, daß die Wiedergabe der Erscheinungen wenigstens in bezug auf die Größenverhältnisse und Lage der Objekte absolut zuverlässig und von keinen Ungenauigkeiten und Irrtümern des Beobachters getrübt ist. So ist die photographische Methode für die regelmäßige Registrierung und die laufende Statistik der wichtigsten Sonnenphänomene von ganz unschätzbarer Bedeutung geworden und hat in dieser Beziehung die Okularbeobachtung fast vollständig verdrängt. Aber auch die Photographie hat ihre Mängel. Bei einem Objekte wie die Sonne, bei welchem wir es oft mit dicht nebeneinanderliegenden Stellen von sehr verschiedener Helligkeit zu tun haben, treten für die photographische Technik große Schwierigkeiten auf. Das erhaltene Bild ist wesentlich von der Dauer der Exposition und der Art der Entwicklung abhängig, und es hängt viel von der Geschicklichkeit des Astronomen ab, wie die mit demselben Fernrohr hergestellte Wiedergabe desselben solaren Phänomens in der Photographie sich darstellt. So wird denn auch

je nach den Zwecken, die man mit der Photographie verfolgt, je nach den Teilen der Erscheinung, auf deren Wiedergabe man den größten Wert legt, und natürlich auch je nach der angewandten Vergrößerung die Expositionszeit in weiten Grenzen variiert. Unter allen Umständen ist sie bei der großen Lichtstärke des zu photographierenden Gegenstandes sehr kurz, sie geht bis zu $^1/_{5000}$ Sekunde herab.

Wenn es sich um die feinsten Details und um schwer zu beobachtende Erscheinungen handelt, ist die subjektive Methode der photographischen wohl immer noch überlegen. Das geübte Auge eines aufmerksamen Beobachters sieht in besonders günstigen Momenten Dinge, welche die photographische Platte kaum wiederzugeben vermag, besonders da häufig neben den Intensitätsverschiedenheiten noch feine Farbenverschiedenheiten ins Spiel kommen, für welche das Auge sehr empfindlich, die photographische Platte aber unter Umständen blind ist. Und so hat die photographische Methode für das Spezialstudium der feinsten Sonnenerscheinungen die subjektive Beobachtung keineswegs verdrängt. Es liegen also auch hier ganz dieselben Verhältnisse vor, wie sie uns schon beim Studium der Mond- und Planetenoberflächen begegneten. Beide Methoden haben ihre Vorzüge, beide ihre Nachteile, und durch das Zusammenwirken beider Methoden kann mehr erreicht werden als durch jede von ihnen allein. Freilich ist bei der subjektiven Methode, besonders wo es sich um die feinsten, der Beobachtung eben gerade noch zugänglichen Einzelheiten handelt, die Gefahr der Voreingenommenheit des Beobachters, die Gefahr von Selbsttäuschung und einseitiger Darstellung viel größer als bei der photographischen Platte, aber auch diese hat ihre subjektiven oder, besser, individuellen Eigenheiten, und nicht alles, was eine photographische Aufnahme zeigt, stellt ein getreues, objektives Bild der Erscheinungen dar. Wie die Dinge sind, können wir nie feststellen, sondern wir müssen uns darauf beschränken zu erfahren, wie sie bei der einen oder andern Art der Beobachtung erscheinen. Je mehr verschiedene Methoden der Beobachtung wir besitzen, desto eher können wir hoffen, dem Wesen der beobachteten Erscheinung näher zu kommen.

Photosphäre. Die Sonne erscheint uns als Kreisscheibe, aber es bedarf kaum einer näheren Begründung dafür, daß die Sonne keine ebene Scheibe ist, sondern eine Kugel. Die leuchtende Oberfläche dieser Kugel, die wir erblicken, wenn wir die Sonne mit dem Auge oder dem Fernrohr beobachten, nennt man Photosphäre, die „Lichthülle". Ihre Helligkeit erscheint nicht gleichmäßig, sondern sie nimmt in der Nähe des Randes stark ab. Diese Abnahme der Intensität ist nicht bloß für die sichtbaren Strahlen zu beobachten, sondern auch für die unsichtbaren, sowohl die ultraroten als die ultravioletten, und sie ist desto stärker, je mehr die Strahlen nach der violetten Seite des Spektrums hin liegen, je geringer also ihre Wellenlänge ist. Die einfachste Erklärung der Helligkeitsabnahme der Sonne nach dem Rande hin besteht in der Annahme einer absorbierenden Sonnenatmosphäre, welche sich über der Photosphäre ausbreitet. Das von der Mitte der Sonnen-

scheibe ausgehende Licht hat dann eine geringere Schicht dieser Atmosphäre zu durchdringen und wird weniger geschwächt als das vom Rande herkommende.

Granulation

Auf dem mittleren, bei oberflächlicher Betrachtung gleichmäßig hell erscheinenden Teile erblickt man bei genügender Vergrößerung eine feine Struktur, die Granulation. Die Elemente der Granulation gehören zu den am schwersten beobachtbaren, feinsten Objekten der Sonne, und ihre Größe und Gestalt wird daher von verschiedenen Beobachtern sehr verschieden angegeben. Nasmyth vergleicht sie mit Weidenblättern, Secchi und Huggins mit Reiskörnern, deren Durchmesser 25 bis 30 Meilen, also bis zu etwa 220 km, betragen soll, Langley zeichnet sie wie Schneeflocken, die auf einem hellgrauen Tuch ausgestreut sind, und schreibt ihnen einen Durchmesser von 350 bis 700 km zu. Für die Photographie stellt die Granulation ein äußerst schwieriges Objekt dar. Die ersten guten Photographien von ihr verdanken wir Janssen in Meudon; sie zeigen ein Mosaik sehr verschiedenartig gestalteter heller Gebilde auf dunklem Grunde. Wie die ausgezeichneten Photographien von Hansky (1905) ergaben, ändern die einzelnen Körner der Granulation in wenigen Minuten ihre Gestalt, Helligkeit und Lage. Die Geschwindigkeit der Bewegung schwankt zwischen 1 und 30 km pro Sekunde, und dabei sind oft die Bewegungen benachbarter Körner voneinander ganz unabhängig.

Fackeln.

Außer diesen unzähligen kleinsten hellen Stellen, welche sehr unbeständige Gebilde sind, treten noch größere Gebiete stärkerer Helligkeit auf, die Sonnenfackeln. Diese haben eine gewaltige Ausdehnung, die mitunter bis zu nahe der Hälfte des Sonnenumfangs anwächst. Sie sind leicht nur in der Nähe des Sonnenrandes zu beobachten; dort, wo die Helligkeit der Photosphäre stark herabgesetzt ist, heben sie sich als auffallende helle Stellen von dem verdunkelten Hintergrund ab. Sie erscheinen als feine wolkenähnliche Gebilde, die sich in ihren feinsten Ausläufern netzartig über die Photosphäre ausbreiten. Auch die Fackeln sind wechselnde Gebilde, welche entstehen und vergehen, sich manchmal nur stundenlang, manchmal aber auch wochenlang an derselben Stelle der Sonne erhalten, wenn sie dabei auch ihre Gestalt fortdauernd ändern. Wenn Fackeln am äußersten Rande der Sonne sichtbar sind, so scheinen sie manchmal über diesen Rand hinauszuragen und sehen aus wie Berge der Photosphäre. Und so hat man die Fackeln allgemein als Erhöhungen der Photosphäre aufgefaßt.

Sonnenflecke.

Die Fackeln treten besonders häufig auf in der Nähe von andern sehr auffallenden Erscheinungen auf der Sonne, den Sonnenflecken. Diese sind Gebilde, die sich als Stellen stark herabgesetzter Helligkeit auf der Photosphäre bemerkbar machen und wegen ihrer außerordentlich auffallenden, sehr wechselnden Erscheinung unter allen Sonnenphänomenen die bekanntesten und für das große Publikum die interessantesten sind. Die alten Astronomen, die daran gewöhnt waren, die schönen Gesetzmäßigkeiten der Himmelsmechanik durch ihre Beobachtungen zu bestätigen, waren von so

veränderlichen Gebilden, wie es die Sonnenflecken sind, wenig erbaut. So sagte Lalande zu einem Anfänger: „Ne vous attardez pas trop aux taches, c'est un phénomène qui n'a pas de loi.“ Die Beziehung zwischen Fackeln und Flecken ist die, daß fast stets in der Nähe eines Fleckes, sobald er sich dem Sonnenrande nähert, Fackeln zu sehen sind, nicht aber in der Nähe einer jeden Fackel auch ein Sonnenfleck. Das zeigt sich schon darin, daß die Fackeln bis in hohe Breiten der Sonne zu beobachten sind, während das Vorkommen der Flecke im wesentlichen auf zwei Zonen in der Nähe des Äquators beschränkt ist. Diese Fleckenzonen erstrecken sich nördlich und südlich des Äquators zwischen dem 10. und 30. Breitengrad. Die Zonen unterhalb 10^0, die unmittelbar am Äquator liegen, weisen auch noch manchmal Sonnenflecke auf, aber viel seltener als die genannten. Oberhalb von diesen aber hören die Flecke fast ganz auf, oberhalb 40^0 sind nur ganz ausnahmsweise Flecke beobachtet worden. Das Maximum der Fackelhäufigkeit fällt zwar mit den Fleckenzonen zusammen, aber gerade die beständigsten Fackeln kommen in 45—60^0 heliographischer Breite vor, und selbst an den Polen sind nicht selten Fackeln zu beobachten.

Kern- und Halbschatten.

Wenn sich ein Fleck auf der Sonne ausgebildet hat, so können wir an ihm zwei Teile unterscheiden: den Kern, Kernschatten oder Umbra, der dunkel, gegenüber der leuchtenden Photosphäre fast schwarz erscheint, und den Halbschatten, auch Hof oder Penumbra genannt, der als ein weniger dunkles Gebiet den Kern umgibt. Man beobachtet häufig Flecke von annähernd kreisförmiger Gestalt, und man kann diese als die Normalform der Flecke bezeichnen. Die Fig. 28 zeigt nach einer Zeichnung von Secchi das Bild eines solchen normalen Sonnenfleckes. Er stellt zwar keinen abgezirkelten Kreis dar, aber er ist nach den verschiedenen Richtungen ziemlich gleichmäßig entwickelt. Wir sehen, daß im Halbschatten Strukturen vorhanden sind, welche wie helle Zungen auf dem dunklen Hintergrunde sich nach dem Kern hin erstrecken. Stellenweise greift die Penumbra in den Kernschatten hinein, und dann ist sie gewöhnlich auch nach außen verbreitert, so daß ihre Begrenzungslinien an der gleichen Stelle ausgebuchtet sind, die innern nach innen in den Kern hinein, die äußern nach außen in die umgebende Photosphäre.

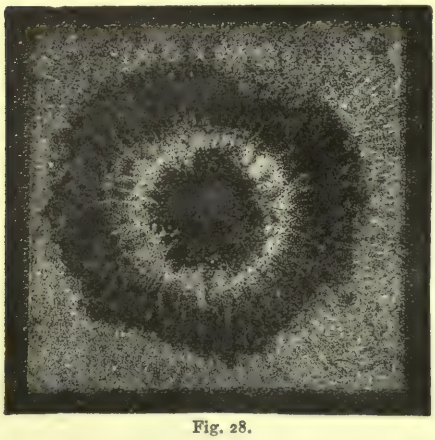


Fig. 28.

Lebensdauer, Entstehen und Vergehen der Flecke.

Solche kreisförmige Flecke sind in der Regel durch verhältnismäßig lange Lebensdauer ausgezeichnet; hat ein Fleck erst diese Gestalt angenommen, so bewahrt er sie gewöhnlich ziemlich lange. Im allgemeinen ist die Lebensdauer der Flecke sehr verschieden. Manche bilden sich schnell und vergehen auch wieder schnell, schon nach einigen Stunden sind sie wie-

der verschwunden, andere bestehen einige Tage, Wochen oder auch Monate. Die mittlere Lebensdauer eines Fleckes beträgt 2—3 Monate. In den Jahren 1840/41 war ein Fleck einmal 18 Monate lang zu beobachten. Auch die Bildung der Flecke geschieht in sehr verschiedener Weise, manchmal geht sie sehr schnell vonstatten, manchmal sehr langsam. Häufig kann man vorher lebhafte Bewegungen in der Photosphäre sehen. Es bilden sich zuerst Poren, kleine dunkle Stellen, deren Ausdehnung zunächst an der Grenze der Sichtbarkeit liegt, dann beginnt eine dieser Poren zu wachsen und bildet sich zu einem Fleck aus. Während dies geschieht, kann man noch nicht Kern und Halbschatten unterscheiden, hellere und dunklere Stellen gehen wirr durcheinander, und erst allmählich beginnen sich diese beiden Teile deutlich abzuheben. Bei der Betrachtung der Flecke müssen wir mit den Bedingungen rechnen, unter denen wir sie überhaupt sehen können. Wir haben ja schon erwähnt, daß die Sonne sich um ihre Achse dreht, und infolgedessen scheint der Fleck auf ihr zu wandern, endlich verschwindet er am westlichen Sonnenrande und erscheint nach etwa 13 Tagen am Ostrande wieder, um in abermals 13 Tagen die Sonnenscheibe wiederum von Osten nach Westen zu durchwandern. Endlich aber sehen wir, daß an einem solchen Fleck, der einige Monate hindurch nahezu unverändert geblieben ist, Veränderungen vor sich gehen, und zwar gewöhnlich so, daß aus dem Halbschatten helle Zungen vorschießen, die schnell vorwärtsgehen und als sogenannte Lichtbrücken in den Kern hineinragen; manchmal tritt eine solche Lichtbrücke auch in der Mitte des Kernschattens auf. Mit dem Erscheinen der Lichtbrücken ist das Schicksal des Flecks in der Regel besiegelt, zwei von beiden Seiten der Penumbra ausgehende Brücken vereinigen sich, so daß sie den Kern ganz durchsetzen, die Lichtbrücke wächst immer weiter, oder es bilden sich neue, die den Kern schließlich vollständig erfüllen, und dann dauert es nicht mehr lange, bis der Fleck vollständig verschwunden ist. Manchmal aber geschieht es auch, daß die beiden durch eine Lichtbrücke getrennten Teile eines Fleckenkerns sich mit rasch wechselnder Geschwindigkeit voneinander entfernen, so daß aus dem einen Fleck zwei entstehen, die getrennt ihr Dasein fristen. Gewöhnlich aber gehen auch diese bald zugrunde.

Fleckengruppen.

Aber diese normale Form der kreisförmigen Flecke wird keineswegs immer oder auch nur in der Mehrzahl der Fälle beobachtet. Vielmehr haben die meisten Flecke eine ganz unregelmäßige, schnell wechselnde Gestalt, und häufig treten sie in ganzen, ausgedehnten Gruppen von meistens etwas langgestreckter Form auf. Aber auch hier sind Kern und Hof mehr oder weniger deutlich zu unterscheiden.

Größe und Helligkeit der Flecke.

Die Größe der Sonnenflecke erreicht mitunter ungeheure Dimensionen, man hat schon mehrfach Flecke beobachtet, deren Kern einen Durchmesser von mehr als 2′ besaß, also von etwa 90000 km oder dem Siebenfachen des Erddurchmessers. Solche Erscheinungen sind aber selten; ein Fleck, dessen Gesamtdurchmesser, Kern und Hof, 50000 km beträgt, ge-

hört schon zu den Ausnahmen. Der größte bisher beobachtete Fleck erschien im Jahre 1858, er hatte eine Länge von 230000 km, war also etwa 18mal so lang wie der Durchmesser der Erde und nahm fast den 36. Teil der gesamten sichtbaren Sonnenoberfläche ein. Ein Fleck von etwa 40000 km Durchmesser ist gerade noch mit bloßem Auge sichtbar, und in den Zeiten starker Fleckentätigkeit erscheint fast in jedem Jahre ein solcher, ohne Fernrohr zu beobachtender Fleck. Die Fleckengruppen nehmen oft ein ungleich größeres Gebiet ein als die größten einzelnen Flecke, hier kommen Ausdehnungen von mehreren hunderttausend Kilometern häufig vor. Wie wir gesehen haben, ist der Halbschatten bedeutend dunkler als die normale Photosphäre, und der Kern ist wieder erheblich dunkler als der Halbschatten, aber trotzdem ist der Kern eines Sonnenflecks keineswegs ein lichtschwaches Objekt, sondern auch er sendet noch eine gewaltige Lichtfülle aus. Schon Galilei sagt, daß aus der Tiefe eines Sonnenflecks viel mehr Licht ausstrahlt als von allen Sternen zusammengenommen, nur durch den viel helleren Hintergrund, auf dem wir ihn sehen, erscheint er uns dunkel. Nach neueren Messungen übertrifft die Helligkeit des Kernes die des Vollmondes um mehr als das Hundertfache.

Gestalt und Niveau der Flecke.

Wenn man die wahre Gestalt der Sonnenflecke erkennen will, so darf man sich nicht darauf beschränken, die Form festzustellen, welche sie dem Beobachter zeigen, sondern man muß darauf Rücksicht nehmen, daß sie sich auf einer Kugeloberfläche befinden und daher je nach ihrer Stellung auf der Sonne unserem Auge in verschiedener perspektivischer Verkürzung erscheinen. Ferner ist zu berücksichtigen, daß es sich nicht um flächenhafte Gebilde handelt, sondern um räumlich ausgedehnte Erscheinungen, und so entsteht die wichtige Frage nach der körperlichen Gestalt der Sonnenflecke und nach ihrer Lage auf dem Sonnenkörper. Sind sie Erhöhungen oder Vertiefungen, liegen sie auf, über oder unter dem normalen Niveau der Photosphäre? Für die Beantwortung dieser Frage waren Beobachtungen von epochemachender Bedeutung, die A. Wilson im Jahre 1774 veröffentlicht hat. Am 22. November 1769 beobachtete er einen Fleck nahe der Mitte der Sonne, der nahezu kreisförmig war, umgeben von einem ebenfalls fast kreisförmigen Hofe (Fig. 29). Infolge der Rotation der Sonne wanderte der Fleck über die sichtbare Sonnenscheibe hin, und Wilson bemerkte, daß sich dabei seine Gestalt zu ändern schien. Je mehr er sich dem westlichen Rande der Sonne näherte, desto schmaler erschien der Kern und der östliche Teil des Halbschattens, während der westliche, dem Sonnenrande zugewandte Teil des Halbschattens nur langsam an Breite abnahm. Endlich dicht am Rande der Sonne war der Kern ganz verschwunden, und man sah von dem Hofe nur den westlichen Teil als schmalen Streifen, der ganze

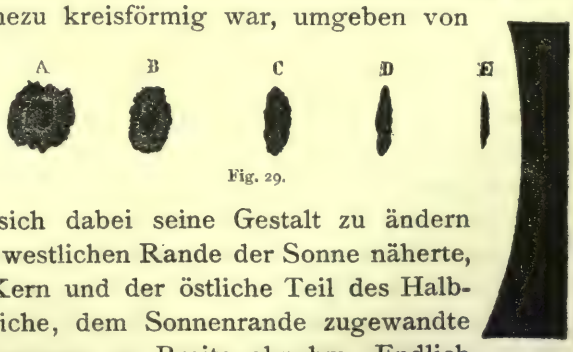


Fig. 29.

Fleck war zu einer dunklen Linie zusammengeschrumpft. Nun wartete Wilson, bis dieser Fleck bei der Rotation der Sonne nach 13 Tagen wieder am Ostrande zum Vorschein kam, und siehe da, er zeigte sich bei seinem Erscheinen wieder in eine dunkle Linie ausgezogen, je mehr er aber sich der Mitte der Sonne näherte, desto mehr nahm er wieder seine ursprüngliche Gestalt an. Es konnte keinem Zweifel unterliegen, daß diese Veränderungen nur scheinbare waren, daß es sich um ein räumliches Gebilde handelt, dessen Aussehen infolge der perspektivischen Wirkung von seiner Stellung gegen den Beobachter abhängt. Aus der Art der beobachteten Veränderung, die man das Wilsonsche Phänomen nennt, schloß Wilson, daß der Fleck die Form eines Trichters besaß, in dessen Inneres der Beobachter hineinblickte. Der Boden des Trichters, der Kernschatten, lag also tiefer als die Trichterwand, der Hof. Somit begründete Wilson die Anschauung, daß die Flecke Vertiefungen in der Sonnenoberfläche darstellen, trichterförmige Einsenkungen in der Photosphäre. Auch über die Tiefe der Flecke konnte er aus seinen Beobachtungen wenigstens angenäherte Schlüsse ziehen; er fand, daß die Tiefe der tiefsten Flecke nicht ganz so groß ist wie der Halbmesser der Erde. Secchi, der später ähnliche Messungen ausgeführt hat, gelangte zu der Ansicht, daß der Kernschatten 3000—9000 km unter dem allgemeinen Niveau der Photosphäre liegt. Spätere Untersuchungen haben ergeben, daß die Mehrzahl der Flecke sich der Wilsonschen Theorie entsprechend verhält, daß aber auch vielfache Ausnahmen vorkommen. So fanden Stewart und Loewy, daß von 600 beobachteten Flecken 75% sich als Vertiefungen darstellten, 12%, also 72 Flecke, das entgegengesetzte Verhalten zeigten, während bei 13% ein Unterschied zwischen der Breite des dem Sonnenrande zugewendeten und des abgewendeten Halbschattens nicht zu bemerken war. Auch über das Niveau der Sonnenflecke läßt sich keine einheitliche Entscheidung fällen, und es scheint, daß auch hier die verschiedenen Flecke sich verschieden verhalten. Dafür scheinen auch die bis jetzt noch spärlichen Resultate der stereoskopischen Methode zu sprechen, bei der man durch Kombination zweier im Abstande von etwa 12 Stunden gemachten Sonnenphotographien ein stereoskopisches Sonnenbild erhält. Dabei glaubt man die verschiedenen Flecke einer Gruppe in verschiedener Höhe der Sonnenoberfläche zu erblicken, und die Fackeln scheinen wie helle Wolken neben und über den dunklen Flecken zu schweben. Leider erscheinen bei dem stereoskopischen Sehen alle zwischen den beiden Aufnahmen entstandenen Verschiebungen der Teile des Flecks gegeneinander als Höhenunterschiede, so daß man einigermaßen sichere Schlüsse erst wird ziehen können, wenn ein sehr reichhaltiges Beobachtungsmaterial vorliegt.

Rotation der Sonne.

Aus der Verschiebung der Flecke auf der Sonnenscheibe hat man zuerst auf eine Rotation der Sonne geschlossen. Der Sonnenäquator fällt nicht mit der Ekliptik zusammen, sondern bildet mit ihr einen Winkel von $7^{0}10',5$, der aufsteigende Knoten hat die Länge $73^{0}46',8$ (Äquin. 1850,0). Dies ist das Ergebnis aus der Bearbeitung der Fleckenbeobachtungen von 1874

bis 1912. Alle auf die Sonnenrotation bezüglichen Angaben können auf große Genauigkeit keinen Anspruch machen, weil die Sonnenflecke und ebenso die andern Phänomene, aus denen wir auf die Rotation der Sonne schließen, auf der Sonnenoberfläche nicht feststehen, sondern starke Eigenbewegungen aufweisen. Obwohl die Sonnenflecke, wie wir gesehen haben, nur auf einem verhältnismäßig beschränkten Teil der Sonne vorkommen, so genügt ihre Beobachtung doch für die Erkenntnis, daß die Rotationsdauer für die verschiedenen Breiten verschieden ist, daß man also bei der Sonne nicht wie bei der Erde von einer bestimmten Umdrehungszeit sprechen kann. Sie ist am kleinsten für den Äquator und nimmt nach Norden und Süden zu.

Außer den Flecken können auch die Fackeln und andere erst neuerdings durch den Spektroheliographen sichtbar gemachte Gebilde, die sogenannten Flocken, zur Rotationsbestimmung der Sonne herangezogen werden, und endlich besitzen wir noch eine auf dem Dopplerschen Prinzip beruhende spektralanalytische Methode, welche uns gestattet, die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Gase der Sonnenatmosphäre an ihrem Westrand von uns fort, am Ostrand auf uns zu bewegen und somit die Umdrehungsgeschwindigkeit der Sonne zu bestimmen.

Aus allen diesen Beobachtungen geht hervor, daß die Sonne nicht wie ein fester Körper rotiert, sondern sich wie ein flüssiger, sei es nun ein tropfbar flüssiger oder ein gasförmiger Körper verhält. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die verschiedenen für die Bestimmung der Rotationsdauer benutzten Erscheinungen nicht alle in der gleichen Höhenschicht des Sonnenkörpers liegen, und es hat sich ergeben, daß die in verschiedenen Höhen liegenden Gase eine etwas verschiedene Umlaufszeit besitzen. Eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse ist in der folgenden Tabelle enthalten:

Rotationszeit der Sonne,
ausgedrückt in mittleren Tagen.

Heliographische Breite	Sonnenflecke	Spektroskopisch	Spektroheliographisch	
			Kalziumflocken	Wasserstoffflocken
	d	d	d	d
0°	25,0	24,4	25,0	25,2
15	25,3	25,0	25,2	24,7
30	26,3	26,0	25,8	24,3
45	—	27,6	25,9	24,8
60	—	29,7	—	—
75	—	31,7	—	—

Periode der Sonnenflecke.

Niemandem, der die Sonnenflecke aufmerksam beobachtete, konnte es entgehen, daß ihre Zahl und Größe sehr starken Schwankungen unterliegt, und zwar nicht nur von einem Tage zum andern, sondern auch im Durchschnitt von Monat zu Monat und von Jahr zu Jahr. Schon im Jahre 1776 hat Horrebow die Vermutung ausgesprochen, daß diese Schwankungen periodischer Natur sind. Der erste, der über die wechselnde Zahl der Sonnenflecke systematische Beobachtungen anstellte, war ein deutscher Apotheker, Heinrich Schwabe in Dessau. Er hat im Jahre 1826 seine Beobachtun-

gen begonnen und sie bis zum Jahre 1868 fast täglich fortgesetzt. Dabei kam er schon 1843 zu dem sehr merkwürdigen Resultat, daß ein periodischer Wechsel in der durchschnittlich sichtbaren Zahl der Flecke stattfindet. Die Zahl der Flecke an verschiedenen nahe aufeinanderfolgenden Tagen ist zwar sehr wechselnd und unregelmäßig; wenn man aber für jedes Jahr aus der täglich beobachteten Fleckenzahl den Jahresdurchschnitt berechnet, so weisen diese Durchschnittszahlen einen auffallend regelmäßigen Gang auf. In einigen aufeinanderfolgenden Jahren wachsen sie immer mehr und mehr an bis zu einem Maximum, von dem sie allmählich wieder zu einem Minimum herabsinken. Darauf wiederholt sich das Spiel von neuem. Schwabe gab die Dauer dieser Periode von einem Maximum zum nächsten auf etwa zehn Jahre an. Zur Zeit des Maximums sind fast stets Flecke zu beobachten, deren Zahl häufig 25 bis 50 beträgt. Zur Zeit des Minimums ist oft wochenlang kein einziger Fleck zu erblicken. Durch Schwabes Entdeckung angeregt, hat R. Wolf in Zürich die alten Literaturangaben über Sonnenflecke genau durchsucht und konnte dabei bis zu Aufzeichnungen aus dem Jahre 1615 zurückgehen. Natürlich hat man in den alten Zeiten nicht systematische Zählungen der Sonnenflecke ausgeführt, sondern es sind nur sporadische Beobachtungen vorhanden, aber doch so viele, daß auch aus diesem historischen Material deutlich die Periodizität der Sonnenflecke hervortritt. Aus der Gesamtheit dieser historischen Nachrichten erschloß Wolf eine Periode von 11,11 Jahren, deren Dauer aber im einzelnen großen Schwankungen unterworfen ist. Später begnügte man sich nicht mehr mit der Zählung der Sonnenflecke, sondern nach dem Vorgange von Carrington und Warren de la Rue schätzt man die Größe des von den Flecken eingenommenen Areals der Sonne. Das Resultat wird in der Weise dargestellt, daß man angibt, wieviel Milliontel der sichtbaren Sonnenoberfläche von den Flecken bedeckt werden. Das Minimum dieser „Flecken-Relativzahlen", also der Fleckenhäufigkeit, liegt nicht in der Mitte zwischen zwei Maximis, sondern näher an dem folgenden als an dem vorhergehenden Maximum, der Anstieg der Fleckenmenge erfolgt also schneller als der Abstieg. Im Mittel beträgt der Zeitunterschied vom Maximum zum Minimum 6,6 Jahre gegen nur 4,5 Jahre, in welchen sich der Wechsel vom Minimum zum folgenden Maximum vollzieht. Im einzelnen ist auch hier der Verlauf der Erscheinungen ein wechselnder, das Zeitintervall von Maximum zu Maximum ebenso wie von Maximum zu Minimum ist ziemlich großen Schwankungen unterworfen, aber der periodische Wechsel mit einer ungefähren Periodendauer von $11\frac{1}{9}$ Jahren ist doch unverkennbar. Da die Intensität der Maxima und der Minima ebenfalls in weiten Grenzen schwankt, so haben verschiedene Beobachter versucht, aus diesen wechselnden Zahlen noch eine Reihe anderer Perioden herauszulesen, die sich über die erste lagern, und deren Dauer zwischen wenigen Monaten und 170 Jahren variiert. Jedoch sind diese Schlüsse sehr unsicher, und, um längere Perioden verbürgen zu können, ist die Gesamtheit der Beobachtungen noch viel zu kurz.

Sonnenstatistik. Die Beobachtungen der Sonnentätigkeit werden seit einer längeren Reihe von Jahren in stets zunehmender Ausdehnung an einer großen Anzahl von Sternwarten regelmäßig mit Hilfe photographischer Methoden ausgeführt. Diesem Zwecke dienen in der Regel besonders eingerichtete, mit einer photographischen Kamera versehene Fernrohre, die man Heliographen nennt. Sie sind häufig unbeweglich aufgestellt, und das Sonnenlicht wird von dem durch ein Uhrwerk bewegten Spiegel eines Heliostaten bei jeder Stellung der Sonne in Richtung der Fernrohrachse dem Objektiv zugeführt. Es sammelt sich so ein umfangreiches statistisches Material an, dessen ausgiebige Verarbeitung aber leider nicht überall durchgeführt wird. Eine große Anzahl von Sternwarten gibt regelmäßig das Resultat ihrer Sonnenregistrierungen in einer Statistik der einzelnen Monate an. Besondere Verdienste um die Statistik der Sonnenflecke haben sich R. Wolf und sein Nachfolger A. Wolfer erworben, die in den Astronomischen Mitteilungen der Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich für die einheitliche Sammlung und Zusammenfassung der umfangreichen vielerorts ausgeführten Fleckenzählungen dauernd Sorge trugen.

Periodizität der Fackeln und Protuberanzen. Die Periodizität der Sonnentätigkeit erstreckt sich nicht nur auf die Flecke, sondern auch auf die Fackeln und die Protuberanzen. Es zeigt sich für diese Erscheinungen im großen und ganzen die gleiche Periode wie für die Flecke. Die Maxima und Minima der Fackelflächen fallen mit denen der Flecke, soweit die Beobachtungen es erkennen lassen, genau zusammen, während die Maxima und Minima der Protuberanzen merklich verspätet gegen die der Flecke eintreten. Für die feineren Einzelheiten dieser Gesetzmäßigkeiten kann es sich, ebenso wie für die der Bewegung und Lage der Flecke nur um Anfänge der Erkenntnis handeln, und die Beobachtungen werden noch über lange Zeiträume hin fortgesetzt werden müssen, ehe man in der Lage sein wird zu entscheiden, was zufällige Zahlengruppierungen und was wirkliche Gesetzmäßigkeiten sind.

Sonnenperiode und irdische Erscheinungen. Bei dem übermächtigen Einfluß, den die Sonne auf das ganze Leben der Erde ausübt, liegt die Frage nahe, ob diese Periodizität in den wichtigsten Erscheinungen der Sonne nicht analoge periodische Schwankungen in den von ihr abhängigen irdischen Phänomenen hervorruft. In dieser Beziehung sind die widersprechendsten Angaben gemacht worden, und man hat geglaubt, vielfache Zusammenhänge zwischen der Sonnenperiode und den Veränderungen irdischer Erscheinungen nachweisen zu können. So hat W. Herschel schon 1801, ehe die Periodizität der Sonnenflecke bekannt war, angenommen, daß die Sonnenflecke einen Einfluß auf die Ernte haben müßten, und er hat versucht, aus den Schwankungen der Getreidepreise in England Schlüsse auf die Schwankungen der Sonnenfleckenhäufigkeit zu ziehen. Ebenso haben indische Meteorologen einen Zusammenhang zwischen der Fleckenperiode und der periodischen Wiederkehr von Hungersnot in Indien vermutet. Diese und andere Vermutungen haben sich aber nicht bestätigt, und überhaupt ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, daß wir an

irdischen Erscheinungen die durch die Sonnenfleckenperiode veränderte Intensität der Sonnenstrahlung sollten erkennen können. Denn eine einfache Überschlagsrechnung zeigt, daß diese Veränderung der Intensität ganz minimal sein muß. Wir können nicht einmal mit Sicherheit sagen, ob die Strahlung beim Maximum stärker oder schwächer ist als beim Minimum. Denn parallel mit der Fleckenhäufigkeit ändert sich ja auch die Häufigkeit der Fackeln, und welches der beiden in entgegengesetztem Sinn wirkenden Phänome überwiegt, läßt sich schwer entscheiden. Umfangreiche Untersuchungen, die von Köppen und anderen, in letzter Zeit besonders auch von L. Mecking ausgeführt worden sind, haben immer nur einen sehr geringen Einfluß der Fleckenperiode auf die meteorologischen Vorgänge bestimmter Ortschaften ergeben. Nach der Köppenschen Regel sollen fleckenreiche Jahre kälter sein als fleckenarme. Besonders verdienen auch die von Meldrum auf Mauritius gemachten und von Poly in Westindien bestätigten Beobachtungen eine längere und genauere Prüfung, nach denen die tropischen Zyklone das Maximum ihrer Häufigkeit in den Jahren der Sonnenfleckenmaxima erreichen sollen. Die richtige Deutung solcher Zusammenhänge wird sich aber erst finden lassen, wenn die Abhängigkeit der Energie der Sonnenstrahlung von der Fleckenperiode durch längere Beobachtungsreihen klargestellt ist. Aus Abbots sich erst über wenige Jahre erstreckenden Messungen scheint zu folgen, daß — im Gegensatz zur obigen Regel — mit der Fleckenzahl auch die Strahlungsintensität zunimmt.

Erdmagnetische Schwankungen.

Eine irdische Erscheinung aber gibt es, deren periodische Schwankungen mit den Sonnenfleckenperioden in unverkennbarem Zusammenhange stehen, das ist der Erdmagnetismus. Die täglichen Schwankungen der Magnetnadel und ebenso die Zahl der unregelmäßigen, schnell verlaufenden Schwankungen, die man als Störungen bezeichnet, zeigen eine Periode, die mit der Sonnenperiode nahezu vollständig parallel geht. Diesen Zusammenhang hat Wolf über die ganze Zeitdauer zurückverfolgen können, über die sich Aufzeichnungen der Sonnenfleckentätigkeit fanden. Die umstehenden Kurven (Fig. 30) zeigen den Parallelismus der erdmagnetischen Erscheinungen und der Sonnenflecke für die Zeit von 1841 bis 1896 mit unverkennbarer Deutlichkeit. Mit den erdmagnetischen Schwankungen stehen auch die Nordlichter in Beziehung, und so zeigt sich auch ein vollständiger Parallelismus zwischen der Häufigkeit der Nordlichter und der Sonnenflecken. Der Zusammenhang zwischen Sonnenflecken und erdmagnetischen Schwankungen läßt sich auch ins einzelne verfolgen. Es ist unzweifelhaft nachgewiesen, daß häufig bei dem Durchgange großer Sonnenflecken durch den Mittelmeridian der Sonne nahezu gleichzeitig große magnetische Schwankungen, sogenannte magnetische Stürme, auftreten. Maunder, der diese Frage systematisch studiert hat, machte darauf aufmerksam, daß sich die Wirkung von den Sonnenflecken nach der Erde geradlinig nach Art der Strahlung fortzupflanzen scheint, und Evershed hat diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu 1600 km, Riccò zu 1000 km in der Sekunde geschätzt.

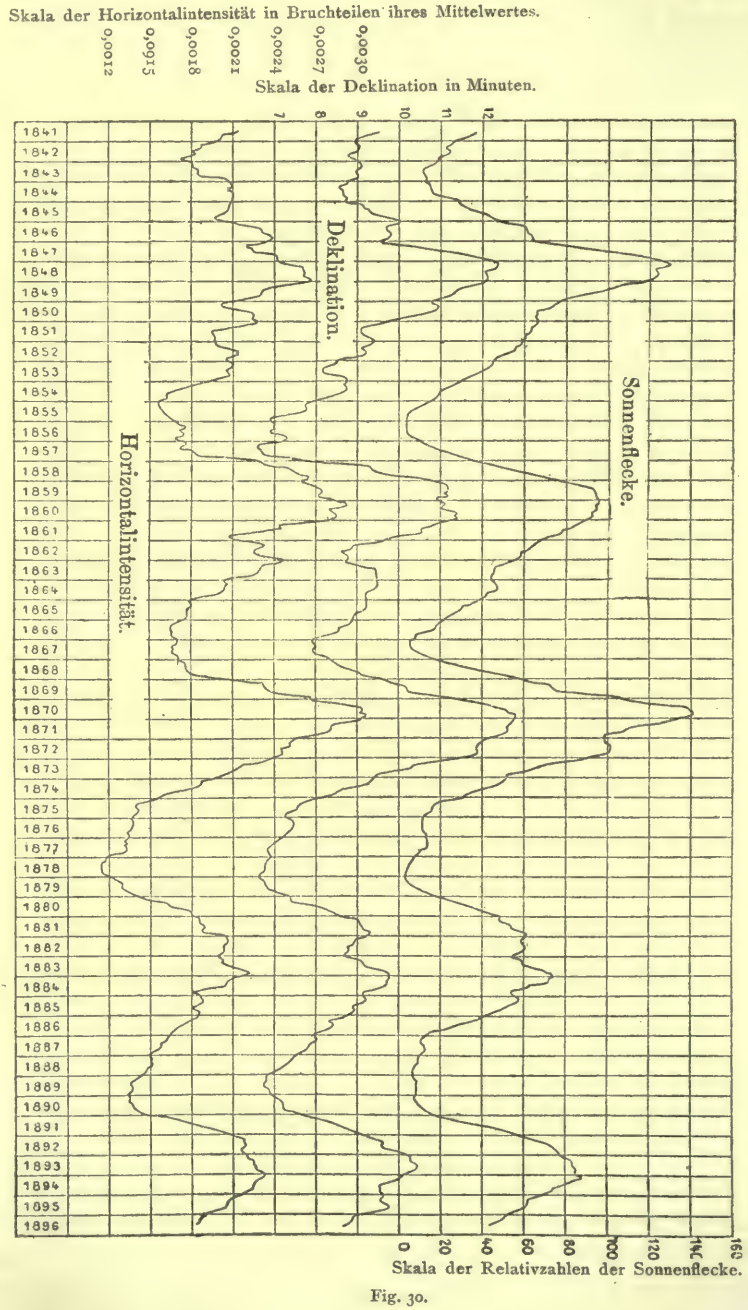

Skala der Horizontalintensität in Bruchteilen ihres Mittelwertes.
0,0012
0,0015
0,0018
0,0021
0,0024
0,0027
0,0030
Skala der Deklination in Minuten.
7
8
9
10
11
12
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
Horizontalintensität.
Deklination.
Sonnenflecke.
0
20
40
60
80
100
120
140
160
Skala der Relativzahlen der Sonnenflecke.

Fig. 30.

Was den Mechanismus dieses Zusammenhanges zwischen den solaren Erscheinungen und dem Erdmagnetismus betrifft, so läßt sich mit Bestimmtheit sagen, daß eine direkte magnetische Wirkung der Sonne auf die Erde ausgeschlossen ist. Dagegen bietet sich eine plausible Erklärungsmöglichkeit in der Annahme, daß von den Sonnenflecken Kathodenstrahlen, d. h. Elektronen, ausgeschleudert werden, welche sich geradlinig durch den Raum fortpflanzen und in den oberen Schichten der Erdatmosphäre die Luft ionisieren. Die mit den Luftströmungen bewegten Ionen sind einem elektrischen Strom äquivalent, dessen magnetische Wirkungen die Störungen des Erdmagnetismus hervorrufen könnten. Wenn dieser Erklärungsversuch auch noch manche willkürliche und unbewiesene Annahmen enthält, so bietet er doch für den Zusammenhang zwischen Sonnenflecken und Erdmagnetismus eine mögliche, den bekannten physikalischen Gesetzen nicht widersprechende Grundlage des Verständnisses.

Mechanismus des Zusammenhanges.

II. Die spektroskopische Beobachtung der Sonne. Die bisher betrachteten Ergebnisse der Sonnenforschung sind im wesentlichen der Anwendung des Fernrohrs zu verdanken. Aber wir verfügen noch über ein zweites, erst sehr viel später bekannt gewordenes Hilfsmittel der Sonnenforschung, dessen Bedeutung der des Fernrohrs nicht nachsteht, das ist die Spektralanalyse. Schon im Jahre 1802 beobachtete Wollaston, daß das Sonnenspektrum, welches auf den ersten Blick dem bekannten kontinuierlichen Spektrum der weißglühenden Körper ähnelt, von einer Anzahl dunkler Linien durchzogen ist, durch die nach seiner Ansicht das Spektrum in die vier Farben Rot, Gelbgrün, Blau und Violett geschieden wurde. Aber erst Fraunhofer, der im Jahre 1814 diese Linien selbständig auffand und sehr sorgfältig untersuchte, erkannte ihre große wissenschaftliche Bedeutung, und mit vollem Recht tragen sie daher den Namen Fraunhofersche Linien. Von ihm rührt auch die erste schon recht genaue Zeichnung des Sonnenspektrums (Fig. 31) und die noch heute gebräuchliche Bezeichnung der auffallendsten Linien mit Buchstaben des Alphabets her. Neben der Fraunhoferschen Zeichnung ist gleichzeitig die scheinbare Helligkeit im Spektrum durch eine Kurve angedeutet. Er zählte zwischen B und H 574 Linien. Verschiedenen Beobachtern ist es aufgefallen, daß einzelne der stärksten Fraunhoferschen Linien die gleiche Lage im Spektrum, also nach der Auffassung der Schwingungstheorie des Lichts die gleiche Wellenlänge besitzen wie helle Linien, welche man im Spektrum leuchtender Gase beobachtet hatte, daß also gerade Licht derjenigen Wellenlängen im Sonnenlichte fehlt, die im Lichte gewisser irdischer leuchtender Gase enthalten sind. Aber man vermochte sich diese Erscheinung nicht zu erklären, bis Kirchhoff und Bunsen durch ihre klassischen Untersuchungen des Rätsels Lösung brachten. Sie haben zuerst durch ausdauernde und mühselige Versuche nachgewiesen, was manche vor ihnen vielleicht schon geahnt hatten, was aber niemand bestimmt ausgesprochen und noch weniger jemand bewiesen hatte, daß jedem chemischen Ele-

Spektralanalyse.

Fraunhofersche Linien.

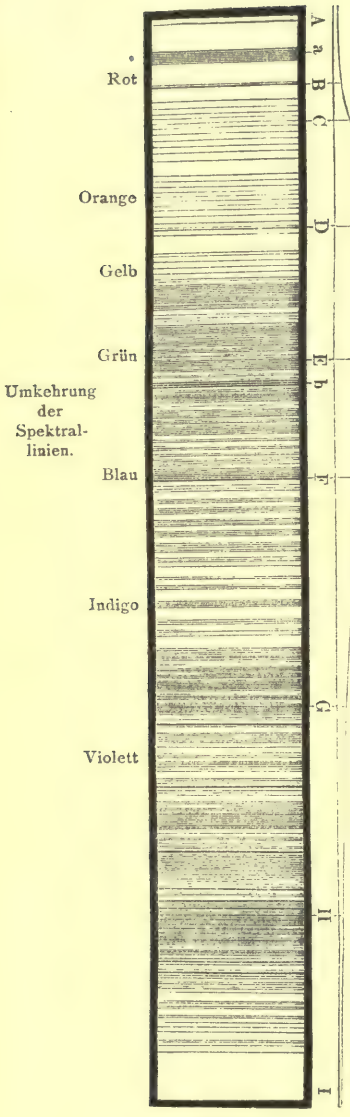


Fig. 31.

ment, wenn es in Gasform zum Leuchten gebracht wird, ein ganz bestimmtes Linienspektrum zugehört. Jedes Element zeigt also bestimmte, ihm allein eigentümliche Linien, und die Spektrallinien sind charakteristisch für das chemische Element, welches sie aussendet. Wir sind daher imstande, aus der Untersuchung des Spektrums einer gasförmigen Lichtquelle auf die chemischen Elemente zu schließen, aus denen sie zusammengesetzt ist, wir können die Lichtquelle durch Beobachtung ihres Spektrums chemisch analysieren, daher der Name Spektralanalyse.

Nun blieb noch die große Frage nach der Bedeutung der Fraunhoferschen Linien zu beantworten. Das gelang Kirchhoff im Jahre 1859 durch seinen berühmten Versuch der Umkehrung der Spektrallinien. Hören wir, wie er selbst den Hergang dieser Entdeckung schildert: „Um die mehrfach behauptete Koinzidenz der Natriumlinien mit den Linien *D* des Sonnenspektrums auf die direkteste Weise zu prüfen, entwarf ich ein mäßig helles Sonnenspektrum und brachte dann vor den Spalt des Apparates eine Natriumflamme. Ich sah dabei die dunklen Linien *D* sich in helle verwandeln. Um zu finden, wie weit die Lichtstärke des Sonnenspektrums sich steigern ließe, ohne daß die Natriumlinien dem Auge verschwänden, ließ ich den vollen Sonnenschein durch die Natriumflamme auf den Spalt fallen und sah da zu meiner Verwunderung die dunklen Linien *D* in außerordentlicher Stärke hervortreten. Ich ersetzte das Licht der Sonne durch das Drumondsche Licht, dessen Spektrum, wie das Spektrum eines jeden glühenden festen oder flüssigen Körpers, keine dunklen Linien hat; wurde dieses Licht durch eine geeignete Kochsalzflamme geleitet, so zeigten sich in dem Spektrum dunkle Linien an den Orten der Natriumlinien.“ Die Nutzanwendung auf die Sonne ergibt sich von selbst. Ebenso wie Kirchhoff die dunklen Linien in dem kontinuierlichen Spektrum des Drumondschen Kalklichts durch eine Natriumflamme hervorgebracht hat, müssen wir annehmen, daß die dunklen Linien *D* des Sonnenspektrums durch Natriumdampf erzeugt sind, und was von diesen Linien gilt, das gilt analog von den übrigen Fraunhoferschen Linien. Wenn wir also bewiesen haben, daß eine dunkle Linie des Sonnenspektrums die gleiche Lage im Spektrum hat wie eine bestimmte helle Linie, von der wir wissen, daß sie für ein bestimmtes Element charakteristisch ist, so ist damit zugleich bewiesen, daß die Fraunhofersche Linie von demselben Elemente herrührt, daß sich also dieses selbe irdische Element in

gasförmigem Zustande auf der Sonne befindet. Wir können uns kaum einen Begriff davon machen, welchen gewaltigen Eindruck diese Entdeckung auf die Zeitgenossen ausübte. Bis 1860 konnte kein Chemiker eine Analyse ausführen, wenn er nicht den betreffenden Stoff in der Hand hatte und seine Reagenzien darauf einwirken lassen konnte. Jetzt war mit einem Schlage die Wirkungssphäre der chemischen Analyse über die engen Mauern des Laboratoriums hinaus ausgedehnt auf den ganzen unendlichen Weltraum, soweit das Licht der entferntesten Fixsterne zu uns dringt. Wenn es bis dahin als eine an Wahnsinn grenzende Vermessenheit erschienen wäre, experimentell die Frage beantworten zu wollen, aus welchen chemischen Elementen die Sonne und die fernen Fixsterne zusammengesetzt sind, jetzt war die Antwort durch verhältnismäßig einfache optische Versuche gegeben.

Spektralanalyse der Sonne.

Aber es blieb noch eine ungeheuer große Arbeit zu tun. Es war nötig, einerseits das Sonnenspektrum, andererseits die Emissionsspektra aller irdischen Elemente mit der größten erreichbaren Genauigkeit zu beobachten um festzustellen, welche Linien bekannter chemischer Elemente mit Fraunhoferschen Linien zusammenfallen. Nun gibt es eine ganz außerordentliche Zahl von Fraunhoferschen Linien und ebenso eine ungeheure Zahl von Spektrallinien der Elemente. Daher liegt die Gefahr sehr nahe, daß man Linien für identisch hält, welche in Wirklichkeit nicht die gleiche, sondern eine, wenn auch nur um ein geringes verschiedene Wellenlänge besitzen. Durch die gewaltige Arbeit, welche Bunsen und Kirchhoff, Ångström, Thalén, Cornu, Rowland und viele andere dieser Aufgabe gewidmet haben, ist die Spektralanalyse der Sonne mächtig gefördert, aber bis jetzt noch nicht zum Abschluß gebracht worden. Der große Sonnenatlas von Rowland ist durch direkte Photographie eines mit einem Konkavgitter entworfenen Normalspektrums hergestellt. Die Wellenlängen sind an der am Spektrum entlanglaufenden Skala unmittelbar abzulesen. Die Dispersion ist eine ungeheure. Die Gesamtlänge des Spektrums beträgt etwa 13 m, es reicht von der Wellenlänge 7331 Ångström-Einheiten (Å.-E.) im Rot bis weit ins Ultraviolette hinein zur Wellenlänge 2976 und enthält sehr nahe 20000 Fraunhofersche Linien. Nach derselben Methode hat Rowland auch die Linienspektra von sehr vielen chemischen Elementen untersucht und mit dem Sonnenspektrum verglichen. Als Resultat aller Untersuchungen läßt sich aussprechen, daß unter den Fraunhoferschen Linien die Linien des größten Teils aller irdischen Elemente wiedergefunden sind. Freilich sind keineswegs alle bekannten irdischen Elemente unter ihnen enthalten, und eine große Anzahl von Elementen ist im Sonnenspektrum überhaupt nicht oder wenigstens nicht mit Sicherheit nachzuweisen. Daraus können wir aber nicht etwa den Schluß ziehen, daß die betreffenden Elemente nicht im Gaszustande auf der Sonne vorhanden sind. Denn nicht alle Elemente sind gleichmäßig geneigt, ein Spektrum zu geben, manche sind sehr leicht, manche wieder nur unter gewissen, sehr eng begrenzten Versuchsbedingungen zum Leuchten zu bringen, und auch von einem und demselben Element sind manche Spektrallinien

Fehlende und unbekannte Linien.

leicht, andere nur schwer zu erhalten. Daher ist das Fehlen von Linien eines Elements in dem Spektrum eines leuchtenden Gemisches von Gasen noch lange kein Beweis dafür, daß dieses Element selbst in dem Gemisch fehlt. Andererseits befinden sich unter den Fraunhoferschen Linien eine große Anzahl, die mit keiner bekannten Linie eines irdischen Elements zusammenfallen. Daraus dürfen wir aber nicht schließen, daß alle oder sehr viele dieser Linien Elementen angehören, die auf der Erde nicht vorhanden sind; denn das Spektrum der Elemente ist kein stereotypes, sondern sehr abhängig von den äußeren physikalischen Bedingungen, unter denen das Gas steht, und von der Art der Erregung des Leuchtens. Da im allgemeinen die Bedingungen des Vorkommens und des Leuchtens der Elemente auf der Sonne wesentlich von den im Laboratorium erreichbaren verschieden sein werden, so ist also sehr wohl die Möglichkeit vorhanden, daß unter den Fraunhoferschen Linien solche sind, welche zwar uns bekannten Elementen angehören, aber bei den uns zugänglichen Methoden der Lichterregung nicht emittiert werden. Überhaupt ist die Kenntnis der Spektra der irdischen Elemente trotz der großen darauf verwendeten Arbeit noch höchst unzureichend. Das wird am besten dadurch illustriert, daß jedes Jahr die Entdeckung einer großen Zahl bis dahin unbekannter Spektrallinien bringt. Ferner sind uns auch die auf der Erde vorkommenden chemischen Elemente gewiß noch nicht alle bekannt. Das können wir schon aus den Lücken schließen, die im periodischen System der Elemente immer noch offen sind, und außerdem haben wir ja gerade in den letzten Jahren gesehen, daß sogar in dem uns vertrautesten Medium, in dem wir leben und atmen, in der atmosphärischen Luft, eine ganze Anzahl chemischer Elemente vorhanden sind, von denen wir bis vor kurzem keine Ahnung hatten. So führt denn bei Berücksichtigung aller spektralanalytischen Erfahrungen die Untersuchung des Sonnenspektrums zu der Überzeugung, daß die Sonne im wesentlichen aus denselben Elementen aufgebaut ist wie die Erde. Der Befund der Spektralanalyse würde somit eine wichtige Stütze liefern für die Kant-Laplacesche Hypothese, daß die Sonne und alle Planeten durch allmähliche Verdichtung aus demselben, den ganzen Raum des Sonnensystems homogen erfüllenden Urnebel entstanden sind.

Helium und Edelgase.

Einige Elemente gibt es, deren Vorhandensein auf der Sonne nicht durch die Fraunhoferschen Linien erschlossen worden ist, sondern durch helle Linien im Spektrum der Chromosphäre und der Protuberanzen. Hier ist es schon vor langer Zeit aufgefallen, daß in unmittelbarer Nähe der beiden gelben Natriumlinien fast stets eine dritte gelbe Linie zu beobachten ist, welche mit keiner bekannten Linie eines irdischen Elements zusammenfiel. Man glaubte, daß diese Linie, welche man mit D_3 bezeichnete, einem auf der Erde unbekannten, nur auf der Sonne vorkommenden Elemente angehöre, welchem Frankland und Lockyer 1869 den Namen Helium gaben. Im Jahre 1895 hat Ramsay gefunden, daß dieses hypothetische, auf der Sonne vermutete Helium auch auf der Erde vorhanden ist. Es ist ein Gas,

welches im Spektrum außer der überaus charakteristischen Linie D_3 noch eine große Anzahl von Linien zeigt, die sich auch im Spektrum der Protuberanzen und der Chromosphäre wiederfinden. Wir haben also die ganz außerordentlich interessante Erscheinung, daß ein irdisches Element auf der Sonne über 25 Jahre früher entdeckt wurde als auf der Erde. Die Linien der anderen sogenannten Edelgase, die Ramsay vor kurzem in der Erdatmosphäre entdeckt hat, sind unter den Fraunhoferschen Linien nicht zu finden, aber nach neueren Untersuchungen ist es wahrscheinlich, daß einige Linien des Argon, Neon, Krypton und Xenon mit Chromosphärenlinien übereinstimmen. Auch vom Radium wird dies neuerdings behauptet, die Beobachtungen erscheinen aber noch nicht als sichergestellt.

Entstehung des Sonnenspektrums.

Außer den chemischen Konsequenzen zog Kirchhoff aus seiner Entdeckung auch sehr wichtige physikalische Folgerungen über die Konstitution der Sonne. Aus dem Versuche der Umkehrung der Spektrallinien schloß er, daß das Sonnenlicht nicht einem einheitlichen Vorgange seine Entstehung verdankt, sondern daß es durch zwei Prozesse zustande kommt: die Photosphäre, ein fester oder flüssiger, sehr heißer Körper, sendet weißes Licht aus; sie ist umgeben von einer Atmosphäre glühender und daher auch absorbierender Gase, und diese berauben das Photosphärenlicht gerade derjenigen Strahlen, die sie selbst aussenden. Sie fügen ihm dabei zwar Strahlen der gleichen Wellenlänge hinzu, wie sie ihm nehmen, aber in viel geringerer Intensität. Daher erscheinen die der Eigenstrahlung der Sonnenatmosphäre angehörigen Stellen des Sonnenspektrums dunkel auf dem hellen Grunde des sonst ungeschwächten Photosphärenspektrums; wir sehen die Fraunhoferschen Linien dem kontinuierlichen Spektrum der Photosphäre schwarz aufgeprägt, eine Geheimschrift, in welcher die Gase der Sonnenatmosphäre ihre Existenz, ihre chemische Natur und ihre physikalische Beschaffenheit dem irdischen Beobachter verkünden. Würden wir das Photosphärenlicht allein auf den Spalt des Spektralapparates werfen können, ohne daß es zuvor die Sonnenatmosphäre passiert hat, so würde es uns ein vollkommen ununterbrochenes kontinuierliches Spektrum zeigen, wie wir es bei unseren gebräuchlichen Lichtquellen sehen. Könnten wir das Chromosphärenlicht allein ohne das ihm beigesellte so viel stärkere Photosphärenlicht untersuchen, so würden wir das für leuchtende Gase charakteristische Spektrum erblicken, helle Linien auf dunklem Grunde.

Totale Sonnenfinsternisse.

Jenen Fall werden wir wohl nie verwirklichen können; diesen bietet uns die Natur selbst dar, allerdings nur bei ganz besonderen Gelegenheiten, den totalen Sonnenfinsternissen. Diese merkwürdigen Erscheinungen haben auch in anderer Beziehung eine so grundlegende Bedeutung für unsere Kenntnis von der Sonne, daß wir uns eingehend mit ihnen beschäftigen müssen. Eine totale Sonnenfinsternis können wir beobachten, wenn der Mittelpunkt des Mondes auf seiner Reise um die Erde die Verbindungslinie zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Beobachtungsort durchschneidet, so daß der Mond an der Sonnenscheibe vorüberzieht. Aber auch bei dieser

Konstellation braucht die Sonnenfinsternis nicht total zu sein, sondern sie kann ringförmig sein. Eine totale Finsternis tritt ein, wenn der Mond bei dem Vorübergange größer erscheint als die Sonne und diese daher vollständig bedeckt. Die Dauer der Totalität und die Größe der Erdzone, auf welcher sie sichtbar ist, wechselt daher mit der wechselnden Entfernung der Erde von Sonne und Mond.

Saros. Infolge der Regelmäßigkeit der Erd- und Mondbewegung kehren die Sonnenfinsternisse periodisch wieder, sie lassen sich so zu Reihen ordnen, daß zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Finsternissen derselben Reihe die Zeit von 6585 Tagen und 8 Stunden oder rund von 18 Jahren und 11 Tagen liegt. Diese schon den Chaldäern bekannte Periode, welche ebenso auch für die Mondfinsternisse gilt, bezeichnet man mit dem chaldäischen Worte Saros. Unter den Sonnenfinsternissen gibt es zwei Reihen, die durch verhältnismäßig lange Dauer der Totalität ausgezeichnet sind. Die eine, welcher die für die Geschichte der Sonnenphysik epochemachende Finsternis von 1868 angehörte, war bei ihren beiden letzten Finsternissen 1886 und 1904 für die Wissenschaft bedeutungslos, weil das Gebiet ihrer Sichtbarkeit in den Bereich des Atlantischen und des Großen Ozeans fiel. Ihre nächste Wiederkehr am 21. September 1922 wird in Nord-Australien sichtbar sein, wo die Dauer der Totalität ungefähr vier Minuten betragen wird. Zu der anderen durch noch längere Dauer ausgezeichneten Reihe gehörten die Finsternisse von 1883 und 1901. Die nächsten Finsternisse dieser Reihe werden in den Jahren 1919, 1937, 1955 und 1973 stattfinden, und die Dauer der Totalität wird gegen sieben Minuten betragen. Innerhalb eines Saros treten 13 totale Sonnenfinsternisse ein, und man hat berechnet, daß derselbe Ort der Erde im Mittel etwa alle 360 Jahre von einer totalen Sonnenfinsternis berührt wird.

Ältere Sonnenfinsternisbeobachtungen. Die wenigen Sonnenfinsternisse, die bisher wissenschaftlich beabachtet werden konnten, sind eine Hauptquelle für unsere Kenntnis der solaren Erscheinungen geworden. Während der Finsternis blendet der Mond nicht bloß das Licht der Photosphäre vollständig ab, sondern er beschattet auch die Erdatmosphäre im weiten Umkreise rings um den Beobachtungsort. Daher können wir die merkwürdigen schwachen Lichterscheinungen, welche die Photosphäre umgeben, beobachten, ungestört durch das in der Erdatmosphäre zerstreute Sonnenlicht, welches sonst diese feinen Objekte so sehr überstrahlt, daß sie uns ebensowenig wahrnehmbar werden wie die Sterne bei Tageslicht. Obschon die Periode des Saros schon im Altertum bekannt war, so konnten die Sonnenfinsternisse doch nicht mit großer Genauigkeit vorhergesagt werden, und so erregten sie bei den gänzlich unvorbereiteten Zuschauern infolge der plötzlich eintretenden Dunkelheit gewaltigen Schrecken. Man sah in ihnen ein Zeichen für den Zorn der beleidigten Gottheit oder glaubte gar, daß ein Drache die Sonne verzehre, und nur wenige hatten die Ruhe des Gemütes, um wenigstens die auffallendsten Erscheinungen, die bei dieser Gelegenheit sichtbar werden, zu beobachten. Wenn auch aus dem

Altertum in chinesischen, assyrischen und griechischen Quellen Sonnenfinsternisse erwähnt werden, so sind uns doch keine Nachrichten erhalten, aus denen hervorginge, daß man die merkwürdigen Erscheinungen beobachtet hätte, die wir als Chromosphäre, Protuberanzen und Korona bezeichnen. Zwar erwähnt schon Plutarch, daß sich bei einer Finsternis rund um die Sonne eine Lichtmasse gezeigt habe, wodurch die Dunkelheit während der Finsternis bedeutend vermindert worden sei; auch Kleomedes hat, wahrscheinlich nach einer Mitteilung des Poseidonios, diese schwache Lichterscheinung besprochen und sich gegen den durch sie veranlaßten Glauben gewendet, daß es überhaupt keine totalen Sonnenfinsternisse gäbe. Aber die erste genauere Nachricht über eine derartige Beobachtung stammt aus dem Jahre 1239, wo ein Chronist meldet, daß man um die Sonne einen leuchtenden Kreis und in dessen unterem Teil eine feurige Öffnung gesehen habe. Eine spätere Mitteilung rührt von Clavius her, der im Jahre 1560 die bei der totalen Finsternis sichtbare Korona zum erstenmal beschreibt. Auch Kepler war die Korona bekannt, aber er glaubte, daß sie eine der Mondatmosphäre zugehörige Erscheinung sei. Die erste wissenschaftliche Erwähnung der Protuberanzen findet sich bei Vassenius, der bei der Finsternis des Jahres 1733 drei oder vier kleine rosenrote Wolken bemerkte, welche, wie er glaubte, ganz frei in der Mondatmosphäre schwebten. Andeutungen über Beobachtungen der Chromosphäre finden sich bei Jacob Scheuchzer und Stannyan 1706 und bei Halley und Louville 1715. Jedoch blieben alle diese Beobachtungen vereinzelt und ohne Einfluß auf die Wissenschaft.

Finsternis vom Jahre 1842.

Die wissenschaftliche Beobachtung der totalen Sonnenfinsternisse datiert erst vom Jahre 1842. Die damalige Finsternis, welche das südliche Frankreich, einen Teil von Norditalien und von Österreich durchzog, war die erste, die genau vorherberechnet worden war, und eine große Anzahl hervorragender Astronomen war wohlvorbereitet ausgezogen, um sie zu beobachten. So wurden damals von verschiedenen Orten aus und von zahlreichen Beobachtern zugleich die wunderbaren Erscheinungen gesehen und beschrieben, die während der Totalität der Sonnenfinsternis um den die Sonne verdeckenden Mond herum wahrnehmbar werden. Sehr anschaulich schildert Baily den Eindruck, den er von dieser Sonnenfinsternis, die er in Turin beobachtete, empfing: „Ich stand, ganz damit beschäftigt, die Schwingungen meines Chronometers zu zählen, um den Moment des völligen Verschwindens der Sonnenscheibe genau zu merken, in tiefstem Schweigen mitten in einer Volksmenge, welche die Straßen, die öffentlichen Plätze und die Fenster der Häuser dicht besetzt hatte, und deren Aufmerksamkeit von dem Schauspiel, das sich ihr darbot, vollständig in Anspruch genommen war. In demselben Augenblick, wo der letzte Strahl verschwand, wurde ich betäubt von einem Ausbruche des Beifallrufens und der Bravos, der sich aus der Mitte dieser ungeheuren Menge erhob. Ein Schauern ergreift meinen Körper, und zitternd richte ich meinen Blick auf die Sonne; ich stehe vor dem entzückendsten Schauspiele, welches man sich denken kann. Sonne und

Fig. 32. Nach C. A. Young, Die Sonne. Verlag F. A. Brockhaus, Leipzig.

Mond, die beiden gewaltigen Gestirne, hängen einander gegenüber zwischen Himmel und Erde, ein pechschwarzer runder Fleck, umgeben von einer hellleuchtenden Strahlenkrone. Bei diesem Anblick hielt das Staunen mich gefesselt; ich verlor einen großen Teil der kostbaren Minuten und geriet in Gefahr, den Zweck meiner Reise zu vergessen. Ich hatte nach den Beschreibungen, die ich darüber gelesen hatte, wohl erwartet, um die Sonne noch ein gewisses, aber ein schwaches und dämmerhaftes Licht wahrzunehmen; statt dessen sah ich eine helle Strahlenkrone, deren Glanz dicht am Rande der Mondscheibe sehr lebhaft war, dann immer mehr abnahm und in einer Entfernung von ungefähr dem Durchmesser des Mondes verschwand. Nichts Derartiges hatte ich vorher vermutet. Ich hatte mich indessen von meinem Erstaunen bald erholt und legte das Auge nach Wegnahme des dunklen Blendglases wieder ans Fernrohr, als eine neue Überraschung mich erfaßte. Die Strahlenkrone, welche die Mondscheibe umgab, war an drei Stellen durch ungeheure purpurne Flammen unterbrochen, deren Durchmesser beinahe $2'$ betrug. Sie schienen stillzustehen und sahen aus wie die von den Strahlen der untergehenden Sonne beleuchteten Gipfel der schneeigen Alpen. Es war nicht möglich zu unterscheiden, ob diese Flammen Wolken oder Berge waren. Als ich noch damit beschäftigt war, sie näher zu untersuchen, fiel der erste Sonnenstrahl in die dunkle Umgebung hinein; er belebte mit einem Schlage die Natur von neuem, aber mich versetzte er in jene traurige Stimmung, die man empfindet, wenn man den Gegenstand seiner heißen Wünsche in dem Augenblick verschwinden sieht, wo man nahe daran ist, ihn zu erfassen."

So hatte diese Sonnenfinsternis gewaltige Gebiete der Sonne entschleiert, erfüllt von wunderbaren Erscheinungen, von denen man früher keine Ahnung hatte.

Die helle Strahlenkrone, von welcher Baily spricht, nennen wir Ko-

Zeichnungen und Photographien der Finsternisse

Fig. 33. Nach C. A. Young, Die Sonne. Verlag F. A. Brockhaus, Leipzig.

rona; dem helleren, rötlich leuchtenden Kranze, der ihren inneren Rand bildet, haben Frankland und Lockyer 1869 den Namen Chromosphäre gegeben, die aus ihm herausragenden intensiv rot leuchtenden Flammen sind die Protuberanzen. Solange man sich damit begnügen mußte, die Erscheinungen der Sonnenfinsternisse nach Okularbeobachtungen zu zeichnen, war es sehr schwer, annähernd richtige Darstellungen davon zu erhalten. Jeder Beobachter suchte in der kurzen Zeit soviel als möglich festzuhalten, faßte das auf, was ihn am meisten interessierte, und zeichnete nachher nach dem Gedächtnis das Erinnerungsbild auf. Daß dieses durch subjektive Momente getrübt ist, kann bei der Eile und Erregung, in welcher diese Beobachtungen gemacht werden müssen, und bei der Zartheit der in Betracht kommenden Objekte nicht wundernehmen. So kommt es, daß die von verschiedenen Beobachtern hergestellten Bilder der gleichen Finsternis große Verschiedenheiten zeigen. Hier bot sich der Photographie ein ganz erlesenes Feld der Tätigkeit. Bei der Schwierigkeit der Objekte ist es aber auch ihr erst in neuerer Zeit gelungen, wirklich schöne Aufnahmen zu gewinnen. Um wenigstens ein schwaches Bild der Erscheinungen zu geben, ist eine Zeichnung der Finsternis von 1860 von Secchi (Fig. 32) und eine Photographie der Finsternis von 1871 nach Davis (Fig. 33) wiedergegeben. Die Zeichnung von Secchi zeigt neben einigen sehr großen Protuberanzen die Chromosphäre und die Korona mit drei sehr breiten und vier schmäleren „Koronastrahlen", welche in unsymmetrischer Anordnung radial weit in den Raum hinausgehen. Die Photographie zeigt ebenfalls die Chromosphäre mit einigen Protuberanzen, in besonderer Schönheit aber die nebelhaft feine, strahlenförmige Struktur der Korona.

Protuberanzen.

Bei der ersten wissenschaftlich beobachteten Sonnenfinsternis von 1842 waren die Protuberanzen sehr auffallend und zogen die Aufmerksamkeit der

Forscher auf sich. Von den verschiedensten Seiten wurden sie entdeckt und beschrieben, aber über ihre Bedeutung gingen die Meinungen weit auseinander. Erstens wurde die Ansicht vertreten, es seien Berge des Mondes, die vom Sonnenlicht irgendwie beleuchtet hell erscheinen. Andere meinten, daß es Berge auf der Sonne seien, wieder andere hielten sie für Flammen auf der Sonne, und ein großer Teil der Beobachter glaubte, daß es überhaupt keine solaren Erscheinungen seien, sondern optische Täuschungen, hervorgebracht durch irgendwelche optische Vorgänge in unserer Atmosphäre. Bei den nächsten Finsternissen 1851 und 1860 konnte zwar mit Sicherheit festgestellt werden, daß die Protuberanzen der Sonne angehören und mit einiger Wahrscheinlichkeit, daß sie leuchtende Gasmassen darstellen, aber erst die Entdeckung der Spektralanalyse schenkte der Wissenschaft eine Methode, von der man eine Entscheidung dieser Frage und einen näheren Einblick in das Wesen der Protuberanzen, der Chromosphäre und der Korona erwarten konnte.

Telespektroskop.

So sahen die Astronomen mit Sehnsucht der Sonnenfinsternis von 1868 entgegen, der ersten, welche die Anwendung spektralanalytischer Methoden, speziell des Telespektroskops, gestattete. In diesem Apparat, der aus der Kombination eines Fernrohres mit einem Spektralapparat besteht, wird das Bild des zu untersuchenden Objekts durch das Fernrohrobjektiv auf dem Spalt des am Okularende des Fernrohres angebrachten Spektralapparates entworfen. Im Gesichtsfelde erblickt man das Spektrum desjenigen Lichtes, welches von den einzelnen auf dem Spalte abgebildeten Stellen des Objekts ausgesandt wird. Ausgerüstet mit diesen Apparaten, waren englische, französische und amerikanische Astronomen nach verschiedenen Orten Indiens gezogen, um die Sonnenfinsternis zu beobachten.

Erste Spektralbeobachtung der Protuberanzen.

Alle Beobachter gelangten zu dem gleichen Hauptresultat, daß das Spektrum der Protuberanzen ein Linienspektrum ist und helle Linien auf dunklem Grunde zeigt. Unter den neun beobachteten Linien befanden sich drei Linien des Wasserstoffs, die allerdings zum Teil nicht richtig erkannt wurden, und ferner eine Linie, welche alle Beobachter für die Linie D des Natriums hielten, die aber in Wirklichkeit die Linie D_3 des Heliums war. So genügten die wenigen Minuten, in denen eine spektralanalytische Untersuchung der Protuberanzen möglich war, um mit absoluter Sicherheit festzustellen, daß diese Gebilde leuchtende Gasmassen sind und daß sie leuchtenden Wasserstoff enthielten. Eine endlose und nur träge fortschleichende Arbeit schien vor den Beobachtern zu liegen, wenn sie genauere und möglichst zahlreiche Untersuchungen über die Spektralanalyse und damit über die chemische Beschaffenheit der Protuberanzen und der Chromosphäre anstellen wollten. Alle paar Jahre einmal eine Beobachtungsgelegenheit von wenigen kostbaren Minuten, deren Ausnutzung nur durch kostspielige Expeditionen möglich war und durch eine einzige an der Sonne vorüberziehende Wolke illusorisch gemacht werden konnte.

Da kann man sich nicht über den gewaltigen Eindruck wundern, den

es auf die wissenschaftliche Welt machte, als kurz nach dieser ersten „spektralanalytischen“ Sonnenfinsternis von zwei Forschern gleichzeitig die Mitteilung gemacht wurde, daß es ihnen gelungen sei, die Protuberanzen am hellen Tage, ohne Sonnenfinsternis, zu beobachten. Als Janssen während der Sonnenfinsternis am 18. August 1868 die überaus hellen Linien der von ihm beobachteten sehr lichtstarken Protuberanz sah, rief er aus: „Je reverrai ces lignes là en dehors des éclipses.“ Unmittelbar nach der Finsternis konnte er keine Beobachtungen ausführen, weil sich der Himmel bewölkte, aber schon am nächsten Morgen gelang es ihm, als erster eine Protuberanz ohne Sonnenfinsternis zu erblicken. Das Prinzip der Methode ist sehr einfach, es besteht in der Anwendung eines Spektralapparates von möglichst großer Dispersion; dadurch wird das kontinuierliche Spektrum des von der Erdatmosphäre zerstreuten Sonnenlichts stark geschwächt, während die Helligkeit der von den Protuberanzen ausgesandten homogenen Spektrallinien nahezu ungeändert bleibt. Daher fällt die störende Wirkung des Tageslichts fort, und die Protuberanzenlinien bieten sich im Telespektroskop der Beobachtung dar. Schon im Jahre 1866 hatte Lockyer die Vermutung ausgesprochen, daß die Protuberanzen als leuchtende Gasmassen ein Linienspektrum aussenden müßten, und gleichzeitig hat er die eben auseinandergesetzte Methode zur Beobachtung der Protuberanzen entwickelt. Er und ebenso Huggins bemühten sich jedoch vergebens, auf diese Weise das Spektrum der Protuberanzen zu sehen. Janssen hatte am Tage nach der Sonnenfinsternis vor diesen Beobachtern mehrere Vorteile voraus. Er kannte genau die Stelle des Sonnenrandes, an welcher am vorhergehenden Tage eine besonders große Protuberanz sich befunden hatte. Es war daher anzunehmen, daß auch am Beobachtungstage an dieser Stelle die Protuberanz noch vorhanden sein würde. Das war in der Tat der Fall, wenn auch nur spärliche Reste des besonders glänzenden Phänomens noch übrig waren. Ferner aber hatte Janssen, und das war der wichtigste Punkt, den Vorteil, nicht nur zu wissen, daß die Protuberanzen helle Linien aussenden, sondern auch die Lage dieser Linien im Spektrum genau zu kennen. Er setzte seine Beobachtungen täglich bis zum 4. September fort, beobachtete die Gestalt der Protuberanzen und fertigte Zeichnungen an, welche zeigten, mit welcher Geschwindigkeit diese ungeheuren Gasmassen häufig ihre Gestalt und Lage ändern. Janssens Beobachtungsstation Guntoor in Indien war so abgelegen, daß seine Nachrichten in Europa erst eintrafen, als schon von andern Expeditionen bekannt gegeben war, daß die Protuberanzen ein Linienspektrum von großer Intensität besitzen. Hierdurch angeregt, gelang es Lockyer am 20. Oktober 1868, auch seinerseits die Protuberanzen ohne Sonnenfinsternis zu beobachten. So ereignete sich der merkwürdige Fall, daß eine epochemachende Entdeckung von zwei Forschern unabhängig voneinander gemacht und am gleichen Tage, dem 26. Oktober, der Pariser Akademie mitgeteilt wurde.

Beobachtung der Protuberanzen ohne Sonnenfinsternis

So schön die spektralanalytischen Entdeckungen der Sonnenfinsternis von 1868 waren, so enttäuschten sie doch die Astrophysiker in einem Punkte.

Flachspektrum.

Man hatte erwartet, entsprechend der Kirchhoffschen Theorie für die Entstehung der Fraunhoferschen Linien im Spektrum der Sonnenatmosphäre alle diejenigen Linien als helle Emissionslinien vorzufinden, welche wir im gewöhnlichen Sonnenspektrum als dunkle Fraunhofersche Linien beobachten. Statt dessen ergaben die ersten Untersuchungen der Protuberanzen nur einige wenige helle Linien, und anstatt im Linienspektrum der Sonnenatmosphäre alle im Sonnenspektrum nachgewiesenen chemischen Elemente wiederzufinden, konnte man nur ein einziges Element, den Wasserstoff, feststellen. Erst bei der Sonnenfinsternis von 1870 klärte sich dieser Widerspruch auf. Young hatte auf dem Spalte seines Spektralapparates diejenige Stelle des Sonnenrandes entworfen, welche bei Beginn der Totalität zuletzt von dem Mondrande bedeckt wurde, die also unmittelbar an der Photosphäre anlag. Im Momente der Bedeckung verschwanden die vorher sichtbaren Fraunhoferschen Linien, und er erblickte das ganze Gesichtsfeld seines Apparates durchzogen von sehr zahlreichen hellen Linien, so zahlreich, daß eine Zählung unmöglich erschien. Diese Erscheinung verschwand nach sehr kurzer Zeit wieder. Die gleiche Erscheinung kann man unmittelbar am Schluß der Totalität beobachten, wenn der Mond auf der andern Seite die Photosphäre eben noch abblendet und die ihr unmittelbar benachbarten Teile der Chromosphäre frei läßt. Dieses blitzartig vorübergehende Spektrum, welches man gewöhnlich mit dem englischen Namen Flash-Spektrum (Blitzspektrum) bezeichnet, macht in der Tat den Eindruck, als ob alle die Linien, die im gewöhnlichen Sonnenspektrum als Fraunhofersche Linien erscheinen, hier umgekehrt als helle Linien auf dunklem Grunde sich darstellten. Wir kommen also zu der Anschauung, daß die Fraunhoferschen Linien nicht in der ganzen, bei der totalen Sonnenfinsternis als Chromosphäre sich zeigenden Sonnenatmosphäre entstehen, sondern im wesentlichen nur in ihrem tiefsten Teile, in einer begrenzten Schicht, die man deshalb als umkehrende Schicht bezeichnet. In ihr sind alle diejenigen Elemente in Gestalt leuchtender Gase vorhanden, deren Anwesenheit auf der Sonne durch die Fraunhoferschen Linien bekundet wird, und in dem kurzen Moment, in welchem wir das Flashspektrum beobachten können, sehen wir das von diesen leuchtenden Gasen ausgehende Licht ohne das von der Photosphäre ausgesandte weiße Licht. So ergab die Youngsche Entdeckung des Flashspektrums eine der glänzendsten Bestätigungen für Kirchhoffs Theorie von der Konstitution der Sonne. In neuerer Zeit ist es bei totalen Sonnenfinsternissen mehrfach gelungen, das Flashspektrum zu photographieren. Dabei sieht man, daß die Entfernung vom Sonnenrande, bis zu der sich die verschiedenen Linien erstrecken, eine sehr verschiedene ist. Wenn wir als umkehrende Schicht diejenige Sphäre der Sonnenatmosphäre bezeichnen, in welcher die große Mehrzahl der Linien des Flashspektrums erscheint, so können wir ihre Tiefe etwa auf 1″ bis 2″, also rund 1000 km, schätzen. Wir sehen aber, daß keine scharfe Grenze zwischen der umkehrenden Schicht und der Chromosphäre besteht, sondern daß beide stetig inein-

Umkehrende Schicht.

ander übergehen. Demnach muß man die umkehrende Schicht als den tiefsten Teil der sichtbaren Chromosphäre betrachten, während die Protuberanzen die ganze Chromosphäre durchsetzen und über sie hinausragen. Umkehrende Schicht, Chromosphäre und Protuberanzen gehören daher eng zusammen.

Spektralanalyse der Chromosphäre.

Die Janssen-Lockyersche Methode zur Beobachtung der Chromosphäre und der Protuberanzen eröffnete für die Sonnenforschung eine ganz neue Ära. Die erste Aufgabe, welche zu lösen war, bestand darin, die Chromosphäre und die Protuberanzen möglichst genau spektralanalytisch zu untersuchen und die in diesen Gebilden enthaltenen chemischen Elemente festzustellen. Da die Methode auf einer möglichst vollständigen Abschwächung des diffusen Himmelslichtes beruht, so wird sie desto bessere Erfolge geben, je schwächer dieses Licht schon an sich ist. Die Bedingungen der Beobachtung werden daher auf hohen Bergen sehr viel günstiger sein als in der Tiefebene mit ihrer viel dichteren und dunstigeren Atmosphäre. Aus diesem Grunde stellte Young im Jahre 1872 in Sherman (Nordamerikanisches Felsengebirge, 2500 m) Beobachtungen an, die die Hauptquelle für unsere Kenntnis des Chromosphären- und Protuberanzenspektrums bilden. Noch günstiger als auf hohen Bergen sind allerdings die Bedingungen der Beleuchtung bei totalen Sonnenfinsternissen, wo man auch noch die allerschwächsten Linien erkennen kann. Im Chromosphärenspektrum sind stets und an allen Stellen der Chromosphäre elf helle Linien zu beobachten, darunter die fünf im sichtbaren Spektrum bekannten Linien des Wasserstoffes $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, $H\varepsilon$, drei Linien des Heliums, ferner die beiden als H und K bezeichneten Linien des Kalziums und endlich eine Linie im grünen Teile des Spektrums, die man bisher noch nicht im Spektrum eines irdischen Elements wiedergefunden hat. Diese fällt mit einer starken Fraunhoferschen Linie zusammen, die in der Kirchhoffschen Zeichnung des Sonnenspektrums bei dem Teilstrich 1474 der Kirchhoffschen Skala (= 5317 A. E.) zu sehen ist und daher als 1474 K bezeichnet wird. Außer diesen Linien, die stets im Chromosphärenspektrum zu beobachten sind, kommen stellenweise, örtlich und zeitlich wechselnd, noch eine große Anzahl anderer Linien mehr oder weniger häufig vor. Im allgemeinen wird das Spektrum der Chromosphäre desto reicher an Linien, je tiefere Schichten von ihr man untersuchen kann, je näher man also mit dem Spalte des Spektralapparates an die Grenze der Photosphäre im Sonnenbilde heranrückt. In neuester Zeit ist es Hale und Adams gelungen, das Spektrum von Chromosphärenschichten zu photographieren, die unmittelbar an der Photosphäre anliegen. Diese Bilder, die eine sehr große Anzahl von Linien enthalten, kann man als außerhalb einer Sonnenfinsternis gewonnene Photographien des Flashspektrums auffassen. Auf ihnen haben Adams und Burwell zwischen den Wellenlängen 4800 und 6600 ungefähr 1500 Linien gefunden und ausgemessen. Manchmal aber kann man auch in höheren Gegenden der Chromosphäre eine große Anzahl von Linien, ausnahmsweise bis zu mehreren Hundert auf einmal erblicken. Ebenso wie unter den Fraun-

hoferschen Linien, so sind auch im Chromosphärenspektrum von den auf der Sonne vorkommenden Elementen keineswegs alle bekannten Linien zu finden, und die einzelnen Linien desselben Elements sind sehr verschieden häufig zu beobachten. Ferner sind auch hier wie bei den Fraunhoferschen Linien keineswegs alle Chromosphärenlinien mit bekannten Linien irdischer Elemente identisch. Von den mehr als 300 Linien, welche Young in der Chromosphäre gefunden hat, sind etwa 60, also 20%, gar nicht, viele andere nicht mit Sicherheit zu rekognoszieren, und nahezu der gleiche Prozensatz findet sich bei den Linien der Photographien von Hale und Adams. Ebensowenig wie bei den Fraunhoferschen Linien zwingt uns diese Tatsache hier, etwa anzunehmen, daß in der Chromosphäre eine große Anzahl auf der Erde unbekannter oder gar überhaupt nicht vorhandener Elemente zu finden sei.

Spektralanalyse der Protuberanzen.

Die Spektralanalyse der Protuberanzen führt zu dem gleichen Resultat. Genau dieselben Linien, welche immer in der Chromosphäre vorkommen, sind auch ausnahmslos in den Protuberanzen in annähernd dem gleichen Häufigkeitsverhältnis zu sehen. Die Zahl der in einer Protuberanz beobachteten Linien schwankt von den stets vorhandenen elf Linien bis zu vielen Hunderten. Hale und Deslandres haben auf photographischem Wege unsere Kenntnis des Protuberanzen- und Chromosphärenspektrums bis weit in das ultraviolette Spektralgebiet ausgedehnt.

Ausdehnung und Gestalt der Chromosphäre.

Die Lockyersche Methode ist nicht bloß geeignet, um das Spektrum der Chromosphäre und der Protuberanzen festzustellen, sondern sie gibt auch ein Bild von der Ausdehnung und Gestalt dieser Erscheinungen. Dabei hat sich ergeben, daß die Chromosphäre sich als eine die Photosphäre umgebende Schicht von sehr ungleichmäßiger Dicke darstellt, deren Höhe zwischen 7000 und 11000 km schwankt. Im allgemeinen ist ihre Oberfläche eben und ruhig, das Licht nimmt von der Basis nach oben an Intensität ab, aber an ihrem oberen Ende ist sie ziemlich scharf begrenzt. Häufig jedoch läuft das Bild der Chromosphäre nach außen in eine große Anzahl kleinerer Strahlen oder unregelmäßig gestalteter Gebilde aus, oder sie erscheint auch wie mit Haaren, Borsten oder Grashalmen besetzt. Diese Grashalme erheben sich oft bis zur doppelten Höhe der normalen Chromosphäre. Wir können sie als kleine Protuberanzen auffassen, wie denn überhaupt zwischen den Erscheinungen der Chromosphäre und den Protuberanzen ein stetiger Übergang stattfindet.

Ruhende und eruptive Protuberanzen.

Die Protuberanzen teilt man in zwei Klassen ein: die ruhenden und die eruptiven Protuberanzen. Obwohl diese Namen den Unterschied des Bewegungszustandes betonen, so ist doch nicht dieser als Einteilungsprinzip maßgebend, sondern vielmehr die spektrale Zusammensetzung. Als ruhende Protuberanzen bezeichnen wir diejenigen, welche das normale Protuberanzenspektrum zeigen, also im wesentlichen aus Wasserstoff, Kalzium und Helium bestehen. Die eruptiven Protuberanzen enthalten außer den elf Hauptlinien dieser drei Elemente noch andere Linien, wobei im wesentlichen Metalllinien in Betracht kommen. Daher werden sie auch metallische Protuberan-

zen genannt. Ihrem Namen entsprechend pflegen die ruhenden Protuberanzen nur langsame Veränderungen des Ortes und der Gestalt zu erleiden, während die eruptiven Protuberanzen häufig, wenn auch nicht immer, sehr heftige Bewegungen und sehr schnell wechselnde Formen aufweisen. Die Erhebung der Protuberanzen über den Rand der Photosphäre ist im allgemeinen für die ruhenden Protuberanzen erheblich größer als für die eruptiven, aber einzelne Eruptionsprotuberanzen erreichen eine größere Höhe als die höchsten ruhenden. Die Protuberanzen treten in außerordentlich vielen verschiedenen Gestalten auf, unter denen Secchi drei Haupttypen unterscheidet, Haufenprotuberanzen, nebelartige Protuberanzen und Strahlenprotuberanzen. Haufenprotuberanzen sind haufenförmige Erhebungen der Chromosphäre, die meist nur eine Höhe von etwa 20000 km erreichen. Wenn sie noch niedriger sind, so erscheinen sie als einfache Anschwellungen der Chromosphäre. Über ihnen sieht man häufig wolkenartige Protuberanzen schweben; ebenso erscheinen sie häufig als der Ausgangspunkt strahlenförmiger Protuberanzen. Die nebelartigen sind die gewöhnliche Form aller Protuberanzen und kommen in sehr verschiedenen Gestaltungen vor, welche Secchi noch durch besondere Namen unterscheidet; sie erreichen meist sehr bedeutende Höhen, bis zu

Fig. 34.

130000 km, und gehören ebenso wie die Haufenprotuberanzen in ihrer großen Mehrzahl zu den ruhenden Protuberanzen mit normalem Chromosphärenspektrum. Die Strahlenprotuberanzen bilden die gewöhnliche Form der Eruptionsprotuberanzen; sie sind seltene, nur kurz dauernde Erscheinungen von großem Glanze, welche häufig heller strahlen als die Chromosphäre selbst. In Fig. 34 sind einige Protuberanzen nach Zeichnungen von Secchi dargestellt. Nr. 4 und 6 sowie 7 und 8 zeigen, wie schnell die Eruptionsprotuberanzen oft ihr Aussehen ändern. Diese verschiedenen Typen und ihre Unterarten sind keineswegs streng voneinander geschieden, sondern sie gehen durch alle möglichen Zwischenstufen ineinander über. Häufig nimmt auch dieselbe Protuberanz in kurz aufeinanderfolgenden Zeiten Formen an, die verschiedenen Arten oder gar Typen angehören.

Wie die Form und Höhe, so ist auch die Ausdehnung und Dauer der Protuberanzen sehr verschieden, mindestens ebenso verschieden wie bei den Sonnenflecken. Man hat mitunter Protuberanzen beobachtet, deren Größe weit über die der Erde hinausgeht, es kommt häufig vor, daß die von einer Protuberanz eingenommenen Gebiete das Volumen der Erdkugel um ein Vielfaches übertreffen. Während die Eruptionsprotuberanzen oft nur wenige Minuten, selten mehr als zwei Stunden zu sehen sind, bleiben die ruhenden oft tage- und wochenlang am Leben, wobei auch ihre Gestalt häufig stunden- und tagelang im wesentlichen unverändert bleibt.

Protuberanzenstatistik.

Eine genaue Statistik der Protuberanzen wird in Italien auf den Sternwarten von Rom und Catania seit 1871 möglichst täglich durchgeführt, auch an der vom Erzbischof Haynald zu Kalocsa in Ungarn gegründeten Sternwarte sind seit 1885 ununterbrochene Beobachtungsreihen im Gange. Aus diesen und anderen Beobachtungen folgt, daß die Protuberanzen im allgemeinen nicht wie die Flecke nur in bestimmten Zonen zu beobachten sind, sondern daß sie überall vom Äquator bis zu den Polen hin vorkommen. Die eruptiven Protuberanzen aber sind auf die gleichen Zonen beschränkt wie die Flecke, und ihr Häufigkeitsmaximum fällt mit dem der Flecke und Fackeln zusammen. Sie scheinen überhaupt mit den Flecken oder vielleicht noch mehr mit den die Flecke umgebenden Fackeln in naher Beziehung zu stehen. Dieser Zusammenhang zeigt sich auch in der schon erwähnten Tatsache, daß die Protuberanzen eine Periodizät der Häufigkeit und Ausdehnung zeigen, die mit der Periode der Flecke im wesentlichen übereinstimmt.

Protuberanzenphotographien.

Auch auf photographischem Wege lassen sich Bilder der Protuberanzen herstellen, nicht bloß durch direkte Photographie bei den totalen Sonnenfinsternissen, sondern auch außerhalb der Finsternisse mit Hilfe der Spektralphotographie. Diese hat aber wirklich schöne Bilder erst geliefert, als man einen besonderen Apparat hierfür konstruiert hatte, den Spektroheliographen, der es gestattet, mit dem Lichte einer einzigen Spektrallinie Photographien der Sonne oder einzelner Stellen der Sonne herzustellen. Diese Methode, deren Idee wohl zuerst von Janssen 1869 ausgesprochen worden ist, wurde von Pater Braun (1873) und von Lohse (1881) ausführlich beschrie-

ben und von Deslandres (1891 und 1893) und von Hale (1892) zum ersten Male mit Erfolg angewendet.

Protuberanzengeschwindigkeiten und Linienverschiebungen

Die gewaltigen Änderungen des Ortes und der Form der Eruptivprotuberanzen gehen so schnell vor sich, daß man diese Gebilde mit erstaunlicher Geschwindigkeit sich ausbreiten und fortbewegen sieht; 100 und 200 km in der Sekunde sind nichts Seltenes, mitunter kommen aber noch sehr viel größere Geschwindigkeiten, bis zu 800 km, vor. Diese ungeheuren Geschwindigkeiten zeigen sich nicht nur in der Aufwärts- und Seitenbewegung, sondern auch in der absteigenden Bewegung, und häufig ist ihre Größe und Richtung plötzlichen, ganz unregelmäßigen Veränderungen unterworfen. Sie sind von jeher der Gegenstand großer Verwunderung gewesen; so spricht Roscoe von der „beinahe unglaublichen Heftigkeit, mit welcher die Bewegungen in der Sonnenatmosphäre auftreten". Es lag die Frage nahe, ob wirklich die leuchtenden Gasmassen selbst so schnelle Bewegungen ausführen, oder ob wir es nicht bloß mit einer Lichterscheinung zu tun haben, die sich in ruhenden oder langsamer bewegten Gasen mit großer Geschwindigkeit fortpflanzt. Man könnte etwa an einen sich explosionsartig fortpflanzenden Entzündungsvorgang oder eine schnell durch den Raum sich ausbreitende elektrische Leuchterregung denken. Aber alle diese Erklärungsversuche mußten verlassen werden infolge einer sehr merkwürdigen Erscheinung, welche Lockyer zuerst im Spektrum einer Protuberanz beobachtete. Mitunter nämlich zeigen die hellen Linien des Protuberanzenspektrums eigentümliche Krümmungen, Verzerrungen und Verschiebungen. Schon lange ehe Lockyer seine Beobachtung machte, war eine Erklärung für diese Erscheinung gegeben durch das von Doppler schon 1842 ausgesprochene Dopplersche Prinzip, welches ganz allgemein für alle Arten von Wellenbewegungen gilt. Dieses Prinzip sagt aus, daß uns die Schwingungszahl einer Wellenbewegung verändert erscheint, wenn die Schwingungsquelle sich relativ zum Beobachter verschiebt. Nähert sie sich dem Beobachter, so erscheint die Schwingungszahl vergrößert; entfernt sie sich, so erscheint die Schwingungszahl verringert. Beim Licht muß sich diese Veränderung der Schwingungszahl durch eine Verschiebung der betreffenden Spektrallinie im Spektrum bemerkbar machen, und es ist leicht, aus der Größe dieser Verschiebung den Anteil der Geschwindigkeit der Lichtquelle zu berechnen, der in Richtung der Verbindungslinie zwischen ihr und dem Beobachter fällt, wie man kurz sagt, die radiale Geschwindigkeit der Lichtquelle. Aus den Verschiebungen, welche die Protuberanzenlinien zeigen, haben wir also nach dem Dopplerschen Prinzip zu schließen, daß die das Linienspektrum aussendenden Gase große Geschwindigkeiten in Richtung auf die Erde zu oder von ihr fort besitzen. Dabei hat sich für diese radialen Geschwindigkeiten der Protuberanzen die gleiche Größenordnung ergeben, zu welcher die direkten Beobachtungen für die transversalen Geschwindigkeiten geführt haben. Auch hier kommt man, wenn auch in seltenen Fällen, bis zu Geschwindigkeiten von 700 km in der Sekunde. Ähnliche Linienverschiebungen, wenn

Dopplersches Prinzip.

auch in geringerer Größe, finden sich auch manchmal in der Chromosphäre. Außer den Verschiebungen zeigen die hellen Chromosphären- und Protuberanzenlinien noch andere Eigentümlichkeiten, nämlich Verbreiterungen, Umkehrungen und doppelte Umkehrungen, lauter Erscheinungen, die wir auch bei irdischen Lichtquellen beobachten können.

Spektrum der Sonnenflecke.

Auch die Untersuchung des Spektrums der Sonnenflecke hat ergeben, daß dieses besondere Eigentümlichkeiten aufweist, die bei den verschiedenen Flecken in sehr verschiedener Weise hervortreten. Einige Fraunhofersche Linien sind verbreitert, verdoppelt oder von Fransen umsäumt, andere ohne merkliche Verbreiterung schwärzer als im gewöhnlichen Sonnenspektrum, noch andere sind schmäler und schwächer oder auch ganz verschwunden, und manche Linien sind im Fleckenspektrum sichtbar, die im gewöhnlichen Sonnenspektrum fehlen. Endlich sind in den Flecken auch Bandenspektren von Verbindungen (Magnesiumhydrid, Titanoxyd, Kalziumhydrid) zu beobachten, die im gewöhnlichen Sonnenspektrum nicht vorkommen. Durch Versuche, die namentlich von A. S. King in Pasadena mit leuchtenden Dämpfen im elektrischen Ofen ausgeführt worden sind, konnte nachgewiesen werden, daß sich viele dieser Veränderungen des Spektrums durch eine niedere Temperatur der Sonnenflecken gegenüber der übrigen Photosphäre erklären lassen. Da ferner das Spektrum der Sonnenflecken Ähnlichkeit mit demjenigen der Fixsterne vom III. Secchischen Typus hat, so darf man schließen, daß auch die Temperatur in den Flecken nahe der jener Sterne entspricht. Nach Wilsings neuesten Messungen beträgt diese etwa 3000° C. Lockyer glaubte aus dem Verhalten der Eisenlinien im Fleckenspektrum folgern zu müssen, daß die irdischen Elemente auf der Sonne in Urelemente zerlegt (dissociiert) seien. Verzerrungen und Verschiebungen von Linien, welche nach dem Dopplerschen Prinzip auf Bewegungen hinweisen würden, sind im Kern wohlausgebildeter Flecke nur gering und lassen auf eine langsame Abwärtsbewegung der absorbierenden Gase schließen; bei den in schneller Bildung oder Umbildung begriffenen Flecken aber kann man häufig sehr starke Linienverschiebungen beobachten.

Korona.

An der Korona können wir nach Secchi drei verschiedene Teile unterscheiden, die jedoch nicht scharf voneinander getrennt sind, sondern ganz allmählich ineinander übergehen. Die erste Zone, die unmittelbar an der nur 10″ bis 15″ hohen Chromosphäre ansetzt, ist eine helle Sphäre von 3′ bis 4′ Höhe und leuchtet in silberweißem Glanze. Sie ist von der zweiten Zone umgeben, deren Helligkeit nach außen hin sehr schnell abnimmt und sich ohne sichtbare Grenze auf dem Hintergrund des bei der Sonnenfinsternis dunklen Himmels verliert. Beide Zonen werden durchsetzt von dem dritten in der Korona enthaltenen Gebilde, den Koronastrahlen, die aus einzelnen strahlenförmigen, aber nicht immer geradlinig verlaufenden Lichtlinien zusammengesetzt sind. Diese erstrecken sich bei den verschiedenen Finsternissen in sehr verschiedener Gestalt, Ausdehnung und Helligkeit mehr oder weniger weit in den Raum hinaus, mitunter bis zur doppelten Länge des

scheinbaren Sonnendurchmessers. Auch die beiden ersten Teile der Korona zeigen eine strahlige Struktur. Ebensowenig, wie es möglich ist, die drei Teile der Korona scharf voneinander zu trennen, können wir bei den Beobachtungen eine scharfe Grenze zwischen den Erscheinungen der Korona und der Chromosphäre ziehen. Diese geht mit ihren kleineren und größeren Erhebungen und den aus ihr emporsteigenden Protuberanzen weit in die Koronaregion hinein, so daß es oft unmöglich ist zu unterscheiden, ob eine beobachtete Erscheinung in der Korona oder in der Chromosphäre mit ihren Protuberanzen ihren Sitz hat. Die Gestalt der Korona sowie die Lage und Ausdehnung der Koronastrahlen scheint je nach dem Stande der Sonnentätigkeit verschieden zu sein. In Jahren des Minimums scheint die Korona im allgemeinen besonders weit und kräftig in Richtung des Äquators ausgebildet zu sein, während an den Polen scharf begrenzte sogenannte Polarstrahlen erscheinen, in Jahren maximaler Sonnentätigkeit scheint sie am Äquator und an den Polen schwach zu sein, so daß sie sich einer mehr viereckigen Gestalt nähert. Jedoch sind alle diese Dinge noch nicht lange und eingehend genug untersucht, um ein sicheres Urteil zu gestatten. Eine Beobachtung oder photographische Aufnahme der Korona ohne Sonnenfinsternis ist trotz mannigfacher dahingehender Versuche bisher nicht gelungen.

Die erste erfolgreiche Beobachtung des Koronaspektrums gelang gleichzeitig Young und Harkness bei der Finsternis des Jahres 1869. Sie fanden das Spektrum kontinuierlich mit einer hellen Linie im Grünen, die mit der schon erwähnten Chromosphärenlinie 1474 K zusammenzufallen schien. Diese Linie gehört dem Eisen an, und so kam man zu dem sehr merkwürdigen Resultat, daß das Eisen in der äußeren Sonnenatmosphäre vorherrschen müßte. Da dies sehr unwahrscheinlich ist, so glaubte Secchi schließen zu müssen, daß es sich um ein unbekanntes Element handle „oder um ein Gas, das die Eigenschaft hat, in den Poren des Eisens sich zu verdichten". Dies unbekannte Element erhielt den Namen Koronium. Erst im Jahre 1899 stellte es sich durch die genaueren Messungen von Fowler heraus, daß die grüne Koronalinie nicht mit der Chromosphärenlinie 1474 K identisch ist, sondern ihr nur sehr nahe liegt ($\lambda = 5303$ A. E.). Außer dieser sind noch eine ganze Anzahl heller Linien in der Korona nachgewiesen, von denen einige dem Wasserstoff, Helium und Kalzium angehören. Im kontinuierlichen Spektrum der Korona sind die Fraunhoferschen Linien zu sehen; wir müssen also annehmen, daß sich in ihr reflektierende Partikeln befinden. Daher ist es auch nicht unmöglich, daß einige helle Linien des Koronaspektrums reflektierte Chromosphärenlinien sind. Außer dem reflektierten Sonnenspektrum scheint die Korona aber auch ein kontinuierliches Eigenspektrum auszustrahlen.

Korona-spektrum.

Die bisher betrachteten Methoden gestatten nur einen kleinen Teil der Sonnenatmosphäre zu untersuchen. Die Photosphäre können wir zwar in der ganzen Ausdehnung ihrer der Erde zugekehrten Seite sehen, von der Chromosphäre und den Protuberanzen aber nur den sehr kleinen Teil, der über den

Spektroheliograph.

Rand der Sonnenscheibe hinausreicht. Das übrige Gebiet der Chromosphäre, welches in der uns sichtbaren Projektion etwa 50 mal so groß ist als der über den Sonnenrand hinausragende Ring, war bis vor wenigen Jahren der Beobachtung vollkommen verschlossen. Daher konnte es Lockyer als eine neue Epoche der Sonnenphysik begrüßen, als eine Methode gefunden wurde, die das Studium der Chromosphäre in ihrer ganzen, der Erde zugekehrten Ausdehnung ermöglicht. Mit jedem Tage mehren sich die schönen Resultate dieser Methode, und sie scheint berufen, den ersten Platz unter allen Hilfsmitteln der Sonnenforschung einzunehmen. Der diesen Untersuchungen dienende Apparat ist der schon erwähnte Spektroheliograph, der ursprünglich zu dem Zweck konstruiert und angewendet worden ist, außerhalb der Finsternisse Photographien der über den Sonnenrand hinausragenden Chromosphäre mit ihren Protuberanzen herzustellen. Das Prinzip des Apparates ist folgendes. Das Bild der Sonne wird durch ein Fernrohr auf der Spaltebene eines Spektralapparates entworfen. Das Licht einer bestimmten Spektrallinie wird an der Stelle, wo das Spektrum auf der photographischen Platte entworfen wird, durch einen zweiten Spalt ausgeblendet, so daß nur dieses Licht auf die Platte fällt und auf ihr das monochromatische Bild desjenigen Teils der Sonne abzeichnet, der gerade auf dem ersten Spalt abgebildet wird. Durch eine mechanische Anordnung wird erreicht, daß gleichzeitig das Sonnenbild über den ersten Spalt und das monochromatische Spaltbild über die photographische Platte hinwandert. So entsteht auf dieser nach und nach mosaikartig ein vollständiges monochromatisches Bild der Sonne.

Kalziumbilder.

Am besten eignen sich für diesen Zweck die im violetten Teile des Spektrums gelegenen auffallend breiten Fraunhoferschen Linien H und K, welche dem Kalzium zugehören. Auf den so erhaltenen Bildern der Sonne zeigen sich ausgedehnte helle Gebiete, besonders rings um die direkt sichtbaren Sonnenflecke, aber auch vielfach ohne Zusammenhang mit diesen, und machen beim ersten Anblick den Eindruck, als ob sie mit den Fackeln übereinstimmten. Das ist aber zweifellos nicht der Fall. Vielmehr haben die hellen Stellen ihren Ursprung nicht in der Photosphäre, sondern in der Chromosphäre. Dies ergibt sich schon daraus, daß sie bedeutend größer sind als die Fackeln, und daß sie die Flecke manchmal ganz oder wenigstens teilweise überdecken. Die spektroheliographischen Bilder sind also als direkte Photographien der Chromosphäre zu betrachten. Je heller an einer Stelle der auf die Photosphäre projizierten Chromosphäre der Kalziumdampf leuchtet, desto heller sind dort die Linien H und K, und desto heller erscheint die betreffende Stelle in dem Spektroheliogramm; dieses stellt eine Karte dar, in welcher allein die Verteilung des Kalziumdampfes in der Chromosphäre angegeben ist. Wenn in der Regel die hellen Gebiete der so erhaltenen Bilder in einer nahen Beziehung zu den Fackeln stehen, so zeigt das nur, daß über den Fackeln im allgemeinen die Chromosphäre besonders reich an leuchtendem Kalzium ist. Wir wissen ja, daß Fackeln und Flecke häufig die Ausgangsstellen für Protuberanzen bilden, in denen die Kalziumlinien

besonders stark ausgebildet sind, und können uns daher über diesen Zusammenhang nicht wundern.

Flocken. Hale hat den hellen Stellen der monochromatischen Bilder den Namen „flocculi“ gegeben, wir wollen sie als „Flocken“ bezeichnen. Diese Flocken oder, wenn es sich speziell um die mit den Kalziumlinien hergestellten Bilder handelt, Kalziumflocken sind Gebilde von sehr verschiedener Größe. Auch in den großen fackelähnlichen Gebieten läßt sich eine gewisse Struktur erkennen, sie scheinen aus einzelnen kleinen Flocken zusammengesetzt. Die kleinsten erkennbaren Flocken reichen bis zu einer Größe von weniger als 1″ herab und ähneln den Elementen in der Granulation der Photosphäre. Das durch den Spektroheliographen erhaltene Bild der auf die Sonnenscheibe projizierten Chromosphäre muß uns anders erscheinen als der kleine über den Sonnenrand hervorragende Teil derselben Sphäre, den allein man mit den älteren Methoden beobachten kann. Während wir diesen gleichsam im Profil sehen, wobei die höchsten Erhebungen am auffallendsten sind, erblicken wir die auf die Photosphäre projizierte Chromosphäre en face, und die höchsten Stellen verschwinden gegen die tiefer gelegenen, die bedeutend lichtstärker sind. Diese tiefer gelegenen Gegenden bis zu einer Schicht, die am Sonnenrande der scheinbaren Höhe von etwa 3″ bis 4″ entspricht, sind es, welche wegen ihrer überragenden Lichtintensität auf den Bildern fast allein zur Geltung kommen.

Mit verschiedenen Linien aufgenommene Spektroheliogramme. Außer mit den Kalziumlinien kann man auch mit einigen andern Linien Spektroheliogramme herstellen. Die so erhaltenen Bilder weisen in den Einzelheiten sehr bedeutende Unterschiede auf, welche zeigen, daß die betreffenden leuchtenden Elemente in verschiedener Weise in der Chromosphäre verteilt sind. Dabei ist auch zu beachten, daß wir die Sonnenatmosphäre in der Durchsicht betrachten, und daß die einzelnen Bilder daher in sehr verschiedenen Höhen der Sonnenatmosphäre ihren Ursprung haben können. So erklären sich auch die Besonderheiten, welche Bilder zeigen, die mit verschiedenen eng begrenzten Teilen der sehr breiten *H*- und *K*-Linien aufgenommen sind. Wenn man spektroheliographische Aufnahmen miteinander vergleicht, die mit derselben Spektrallinie auf genau die gleiche Weise in kurzen Zwischenräumen hintereinander ausgeführt worden sind, so bemerkt man deutlich auffallende Veränderungen in der Lage und Gestalt der Flocken von einer Aufnahme zur andern. Aber manche der größeren Flockengebiete und häufig auch kleinere Flocken von charakteristischer Gestalt und Gruppierung verändern sich so langsam, daß es mitunter möglich ist, sie von einem Tage zum andern zu verfolgen und ihre Lage auf der Sonnenscheibe festzustellen. Da sie sich mit der Sonne drehen, so bietet sich die neue, schon kurz erwähnte Methode zur Bestimmung der Sonnenrotation dar, die bis zu höheren Breiten der Sonne verwendbar ist als die früheren; neuerdings hat Kempf in Potsdam eine wertvolle Beobachtungsreihe dieser Art veröffentlicht.

Zeemaneffekt. Bei den schönen mit der roten Wasserstofflinie $H\alpha$ gewonnenen Spektro-

heliogrammen hat Hale zuerst beobachtet, daß die Flocken an vielen Stellen eine spiralförmige Anordnung zeigen, die auf eine Wirbelbewegung der das Licht emittierenden Gase schließen läßt. Hale kam zu dem Resultat, daß diese spiralige Anordnung der Flocken wahrscheinlich bei allen Sonnenflecken zu beobachten ist, aber auch an Stellen, wo kein Fleck vorhanden ist. Man hat aus verschiedenen Gründen darauf geschlossen, daß die Gase der Sonnenatmosphäre ionisiert sind, und daß dabei eine freie elektrische Ladung auftritt, daß also die Ionen der einen Art, in der äußeren Atmosphäre wahrscheinlich die negativ geladenen, in überwiegender Anzahl vorhanden sind. Nach den Prinzipien der Elektrodynamik aber sind bewegte ionisierte Gase gleichbedeutend mit einem elektrischen Strom, es muß von ihnen daher eine magnetische Wirkung ausgehen. Die Sonnenwirbel müssen demnach der Sitz magnetischer Kräfte sein, deren Kraftlinien parallel zur Wirbelachse verlaufen. Wenn wir in einen solchen Wirbel hineinsehen, so hat das zu uns gelangende Licht seinen Weg durch die im magnetischen Kraftfeld befindlichen selektiv emittierenden und absorbierenden Gase genommen. Es sind also die von Zeeman 1896 entdeckten Erscheinungen zu erwarten, die wir bei irdischen gasförmigen Lichtquellen beobachten, wenn sie sich in einem magnetischen Felde befinden. Die einfachste Form des Zeemaneffekts besteht darin, daß die Spektrallinien verdoppelt erscheinen, in zwei Komponenten gespalten, die aber nicht aus gewöhnlichem, unpolarisiertem Lichte bestehen, sondern von denen die eine rechts, die andere links zirkularpolarisiert ist. So erhält die schon erwähnte Erscheinung, daß im Spektrum der Sonnenflecke Linien, die wir sonst als einfach kennen, uns doppelt erscheinen, eine überraschende Erklärung. Hale konnte 1908 bei einer Anzahl solcher Doppellinien tatsächlich nachweisen, daß die eine Komponente rechts, die andere links zirkularpolarisiert war. Durch diese Haleschen Beobachtungen ist mit voller Bestimmtheit nachgewiesen, daß der Zeemaneffekt auf der Sonne vorhanden ist, und daß die Sonnenflecke — ob alle oder nur ein Teil von ihnen, steht noch dahin — als Sitz magnetischer Felder zu betrachten sind. Auch die Größe der magnetischen Feldstärke läßt sich aus dem Abstand der beiden Komponenten bestimmen. Hale fand bei den bisher untersuchten Linien Feldstärken bis 3000 Gauß. Daß diese magnetischen Felder auf der Sonne nicht dazu dienen können, durch ihre direkte magnetische Wirkung die Beziehungen der Sonnenflecke zum Erdmagnetismus zu erklären, ist schon oben bemerkt worden. Durch genauere Untersuchung des Zeemanphänomens auf der ganzen Sonnenoberfläche ist Hale 1913 zu der Anschauung geführt worden, daß die Sonne auch noch ein allgemeines Magnetfeld besitzt, welches aber bedeutend schwächer ist als das in den Flecken beobachtete. Es besteht eine vollkommene Analogie zwischen diesem Sonnenmagnetismus und dem Erdmagnetismus, die magnetischen Pole der Sonne scheinen nahezu mit den Polen der Rotation zusammenzufallen, und die Beziehung zwischen Rotationssinn und magnetischer Polarität ist die gleiche wie auf der Erde.

III. Strahlung und Temperatur der Sonne. Noch bleibt uns eine sehr wichtige Frage zu besprechen: die Frage nach der Temperatur der Sonne. Diese wurde früher von verschiedenen Forschern nach sehr unzuverlässigen Methoden geschätzt. Die Resultate lagen außerordentlich weit auseinander, sie schwankten zwischen 1600 und 10000000° C. Zuverlässige Anhaltspunkte hat erst der Ausbau der modernen Strahlungslehre gebracht, und so steht die Frage nach der Temperatur der Sonne jetzt im engsten Zusammenhang mit der Frage nach der von der Sonne ausgesandten Strahlungsenergie. Da die Sonnenstrahlung auf dem Wege zur Erdoberfläche die Erdatmosphäre durchlaufen muß, in der sie eine sehr beträchtliche Absorption erleidet, so ist die an der Erdoberfläche gemessene Energie der Sonnenstrahlung in hohem Maße von der augenblicklichen Beschaffenheit der Erdatmosphäre, also von den Einflüssen der Witterung, abhängig und ändert sich außerdem je nach dem Stande der Sonne. Temperatur der Sonne.

Um in den Resultaten von diesen wechselnden Einflüssen frei zu werden, hat man als Maß der Sonnenstrahlung die Solarkonstante eingeführt, d. h. diejenige Wärmemenge, gemessen in Grammkalorien, die von der Sonne in ihrem mittleren Abstand von der Erde während einer Minute bei senkrechter Einstrahlung auf eine Fläche von 1 qcm einfallen würde, wenn die Erde keine Atmosphäre hätte. Diese Größe ist allerdings leichter zu definieren als zu messen. Da man die Erdatmosphäre nicht beseitigen kann, so muß man die Aufgabe in zwei Teile spalten, zuerst muß man die auf eine gegebene Fläche auf der Erde einfallende Energie möglichst genau messen, sodann muß man den Betrag der Energie zu bestimmen suchen, der in der Erdatmospäre absorbiert wird. Der erste Teil der Aufgabe ist prinzipiell sehr einfach zu lösen. Wir lassen die Sonnenstrahlung auf einen Körper fallen, der sie möglichst vollständig absorbiert, und messen die dem Körper während einer gewissen Zeit zugeführte Wärmemenge. In der Praxis bietet die Ausführung allerdings große Schwierigkeiten; man hat zu diesem Zweck eine Reihe besonderer Apparate konstruiert, die man als Aktinometer oder Pyrheliometer bezeichnet. Eine noch viel größere Schwierigkeit aber liegt im zweiten Teil der Aufgabe, in der Elimination der Wirkung der Erdatmosphäre. Man geht dabei allgemein auf die bekannte Extinktionsformel zurück, welche die Abhängigkeit der Schwächung des Lichts von der Länge der durchstrahlten Schicht des lichtschwächenden Mediums angibt. Indem man die Sonnenstrahlung zu verschiedenen Tageszeiten mißt, so daß das Licht sehr verschieden lange Wege in der Erdatmosphäre zurückzulegen hat, kann man den Einfluß der Schwächung in der Atmosphäre schätzen und den Wert der Solarkonstante bestimmen. Dabei wird die Gefahr einer fehlerhaften Bestimmung um so größer, je größer die durch die Erdatmosphäre verursachte Schwächung ist; daher haben viele Beobachter möglichst hohe Beobachtungsstationen gewählt. Einen andern Weg hat Langley eingeschlagen. Die frühere Anwendung der Extinktionsformel litt an einem prinzipiellen Mangel; die Formel gilt nämlich nach der Theorie nur für homogenes Solarkonstante. Aktinometer und Pyrheliometer.

Licht, sie wurde aber auf die ganze von der Sonne ausgehende Strahlung angewendet, die keineswegs homogen ist, sondern aus einer unzähligen Menge verschiedener Wellenlängen, vom äußersten Ultrarot bis zum äußersten Ultraviolett, besteht. Um also theoretisch richtig zu verfahren, müssen wir den Einfluß der Absorption der Erdatmosphäre für jede einzelne homogene Strahlung gesondert feststellen und dann die für die einzelnen Strahlen gewonnenen Resultate kombinieren.

Energieverteilung im Sonnenspektrum.

Dazu müssen wir aber zunächst wissen, welchen Anteil die einzelnen homogenen Strahlen an der Gesamtstrahlung der Sonne haben. Diese Frage, die zuerst 1870 von Lamansky untersucht worden ist, hat Langley in ausgezeichneter Weise gefördert mit Hilfe seines Spektralbolometers, das er später zu einem selbstregistrierenden Apparat, dem Bolographen, ausgestaltet hat. Dieser Apparat liefert die sogenannten Bologramme, Kurven, welche die Verteilung der Energie der Sonnenstrahlung unter die verschiedenen Wellenlängen darstellen. Wenn man nun bei verschiedenem Sonnenstande rasch hintereinander solche Bologramme aufnimmt und gleichzeitig mit Hilfe eines Aktinometers die Gesamtstrahlung mißt, so erhält man aus den Bologrammen die Korrektion, die man an den durch das Aktinometer gemessenen Werten anzubringen hat, um den Einfluß der Erdatmosphäre zu eliminieren, und gewinnt so die Solarkonstante.

Resultate.

Abbot und Fowle, welche diese Methode verbessert und vielfach angewendet haben, geben als wahrscheinlichsten mittleren Wert der Solarkonstante 1,93 cal., also rund 2 cal. an. Nach ihren Beobachtungen kann es kaum mehr einem Zweifel unterliegen, daß diese „Konstante“ von einem Tage zum andern kleine Veränderungen erleidet, außerdem aber ändert sie sich auch im Laufe der Jahre. Sie scheint vom Stande der Sonnentätigkeit abzuhängen, und zwar soll sie zu Zeiten des Maximums der Sonnenfleckenperiode größer sein als beim Minimum. Jedoch bedürfen diese Schlüsse noch der Bestätigung durch längere, von verschiedenen Stationen gleichzeitig ausgeführte Beobachtungen.

Effektive Sonnentemperatur.

Wenn die Solarkonstante bekannt ist, so läßt sich daraus mit Hilfe der Strahlungsgesetze ein Schluß auf die Temperatur derjenigen Region der Sonne ziehen, von welcher die Strahlung im wesentlichen ausgeht, also der Photosphäre. Zunächst läßt sich mit großer Genauigkeit eine Größe bestimmen, die Violle als effektive Sonnentemperatur bezeichnet hat, d. h. die Temperatur eines „absolut schwarzen Körpers“ von der scheinbaren Größe der Sonne, welcher uns die gleiche Strahlungsenergie zusenden würde wie die Sonne. Ein absolut schwarzer Körper ist nach Kirchhoffs Definition ein solcher, welcher alle auf ihn fallende Strahlung vollständig absorbiert, also Strahlung weder reflektiert noch hindurchläßt. Aus dem Stefanschen Gesetz, welches aussagt, daß die Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers mit der vierten Potenz der absoluten Temperatur fortschreitet, ergibt sich diese effektive Sonnentemperatur zu etwa 5600° C. Andere Schätzungen der Sonnentemperatur auf Grund der Strahlungsgesetze führen zu

Zahlen der gleichen Größenordnung. Die wahre Sonnentemperatur ist sicher nicht kleiner als die effektive. Wir können mit großer Wahrscheinlichkeit schließen, daß sie nicht mehr als 10000° C. betragen kann. Wir hätten sie also zwischen die Werte 5600 und 10000° C. eingeschlossen, wahrscheinlich liegt sie dem ersten Werte erheblich näher als dem zweiten. Dabei müssen wir immer im Auge behalten, daß das die mittlere Temperatur einer bestimmten Schicht der Sonne, der Photosphäre, ist. Nach innen und außen ändert sich die Temperatur in unbestimmbarer Weise, aber höchstwahrscheinlich sehr schnell, so daß im Innern der Sonne zweifellos ganz unvorstellbar hohe Temperaturen herrschen. Die höchste mit unsern experimentellen Mitteln bis vor kurzem herstellbare Temperatur, die des elektrischen Kohlebogens, beträgt etwa 3700°; neuerdings hat O. Lummer bei unter hohem Druck brennenden Bogenlampen Temperaturen erzeugt, welche die effektive Sonnentemperatur zu übertreffen scheinen. Wahre Sonnentemperatur.

Wenn wir als Wert der Solarkonstante $S = 2$ zugrunde legen, so ist es leicht, die Energiemengen zu berechnen, welche die Sonne der Erde dauernd zusendet. Die im Laufe eines Jahres auf die Erdoberfläche fallende Wärme würde ausreichen, um eine Eishülle von etwa 40 m Dicke rings um die Erde zu schmelzen. Wenn wir die durch die Sonnenstrahlung der Erde zugeführte Leistung berechnen, so erhalten wir die gewaltige Zahl von 250 Billionen Pferdestärken. Mit Recht bewundern wir die großartigen Erfolge der modernen Technik, der es gelungen ist, viele Tausende von Pferdestärken an dünnen Drähten Hunderte von Kilometern weit zu übertragen. Hier sehen wir täglich vor unsern Augen, ohne zu erstaunen, eine unvergleichlich größere Leistung von der Natur verrichtet, eine Kraftübertragung von 250 Billionen Pferden auf die riesige Entfernung von 150 Millionen Kilometern, und das alles, die kühnsten Phantasien der fortgeschrittensten Ingenieure übertreffend, ohne Draht, allein fortgetragen durch die unsichtbaren Schwingungen der den Weltraum durcheilenden Ätherwellen. Energiestrahlung der Sonne.

Aber diese gewaltige Energieströmung bildet nur einen verschwindend kleinen Teil der ganzen von der Sonne in Form von Strahlung ausgesandten Energie. Es läßt sich leicht berechnen, daß von der Sonne dauernd in das Weltall ein Energiestrom hineingeht, der einer Leistung von nicht weniger als 580000 Trillionen Pferdestärken entspricht. Wenn die Sonne diesen ungeheuren Wärmeverlust aus ihrem Wärmevorrat decken müßte, so würde ihre Temperatur jährlich um mehr als 1° sinken. Nun können wir aus den geologischen Tatsachen schließen, daß das organische Leben auf der Erde viele Millionen Jahre alt ist; in dieser Zeit hat sich die Sonnenstrahlung sicher nicht so bedeutend geändert, wie es einer Temperaturerniedrigung von vielen Millionen Graden entspricht. Vielmehr spricht alle Erfahrung dafür, daß die Sonnentemperatur im wesentlichen unverändert geblieben ist. Die Sonne muß also ein Mittel besitzen, den durch Ausstrahlung verursachten Verlust ganz oder zum Teil wieder auszugleichen, also ein Mittel zur Erzeugung von Wärme.

Energiequellen der Sonne. Meteore und Kontraktion.

Eine solche, physikalisch mit voller Sicherheit begründete Quelle der Sonnenwärme hat Julius Robert Mayer, der Entdecker des mechanischen Äquivalents der Wärme, aufgedeckt. Sie besteht in der kinetischen Energie der Meteore, welche auf die Sonne auffallen. Eine genauere Rechnung ergibt aber, daß die vorhandenen Meteormengen nicht im entferntesten ausreichen, um den Wärmeverlust der Sonne zu decken. Eine andere mechanische Theorie hat Helmholtz aufgestellt, er macht darauf aufmerksam, daß die Sonnenkugel infolge der Gravitation sich immer mehr zusammenziehen muß, und daß dieses langsame Fallen der Massen nach dem Zentrum hin eine dauernde Wärmeerzeugung verursacht. Diese allmähliche Zusammenziehung der Sonne bildet den eigentlichen Grundgedanken der Kant-Laplaceschen Hypothese über die Entstehung des Sonnensystems. Danach soll die ganze in der Sonne und ihren Trabanten vorhandene Materie ursprünglich in Form eines rotierenden Urnebels den ganzen von dem Sonnensystem eingenommenen Raum erfüllt haben. Durch die Gravitation hat sich der Urnebel immer weiter und weiter zusammengezogen, und infolge der Zentrifugalkraft der Rotation sind nach Laplace nach und nach die Planeten aus ihm ausgestoßen worden. Der bei weitem größte Teil der ursprünglichen Masse bildet den Sonnenkörper. Helmholtz hat berechnet, daß eine Verringerung des Sonnenradius um 75 m jährlich genügen würde, um den Strahlungsverlust zu ersetzen, das würde im Laufe von 29500 Jahren erst eine Verkleinerung des scheinbaren Sonnenradius um eine Bogensekunde bedeuten, also weit unter der Grenze astronomischer Wahrnehmbarkeit bleiben. Die Wärme, welche die Sonne bei ihrer Zusammenziehung aus dem Urnebel bis zu ihrem heutigen Zustande erzeugt hat, würde ausgereicht haben, ihren Strahlungsverlust nicht weniger als 22 Millionen Jahre der Vergangenheit zu decken, und bis die Sonne die Dichtigkeit der Erde erreicht, könnte sie noch weitere 17 Millionen Jahre die gleiche Wärmemenge ausstrahlen wie jetzt. Die bezeichneten gewaltigen Zeiträume erscheinen aber immer noch nicht genügend groß, um das von den Geologen aus den Theorien über die Vergangenheit der Erde gefolgerte Alter der Sonne zu ergeben, sie könnten aber zu beträchtlich höheren Werten gebracht werden, wenn man einer in den letzten Jahren aufgefundenen Energiequelle auf der Sonne einen Platz einräumt.

Radium.

Curie und Laborde haben zuerst gezeigt, daß das Radium fortdauernd Wärme erzeugt, so daß 1 g Radium in der Stunde 138 g cal. Wärme abgibt, ein Betrag, der sich im Laufe der Zeit nicht meßbar ändert. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die Quelle dieser Energie im Zerfall der Atome besteht. Da eines der Zerfallprodukte des Radiums das Helium ist, dessen Spektrum eine so große Rolle in der Sonnenstrahlung spielt, so können wir schließen, daß das Innere der Sonne reich an Radium ist, und wir hätten daher auf der Sonne möglicherweise eine Energiequelle von ungeheurer Größe, die wohl geeignet wäre, die Sonnenstrahlung viele Millionen von Jahren zu unterhalten. W. E. Wilson hat berechnet, daß ein Gehalt von 3,6 g Radium im Kubikmeter der Sonne erforderlich wäre, um die ganze von der Sonne

ausgestrahlte Wärmemenge zu liefern. Freilich wissen wir nicht, wie sich das Radium bei so hohen Temperaturen verhält, ob es dabei überhaupt bestehen und Wärme aussenden kann, und es ist daher ganz unmöglich, den Einfluß des Radiums und der anderen radioaktiven Substanzen auf das Alter der Sonne und die Dauer ihres Fortbestehens auch nur in der rohesten Annäherung zu schätzen.

Die Sonnenstrahlung als Quelle alles irdischen Lebens.

Die Frage nach dem Ersatze der der Sonne durch Strahlung entzogenen Wärme und nach der Dauer des Fortbestandes in dem jetzigen Zustand ist deshalb von außerordentlicher Tragweite, weil das gesamte Leben der Erde allein durch die Energie erhalten wird, die uns die Sonne zustrahlt. Wenn die Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche fallen, so werden sie von ihr zum großen Teile absorbiert. Die in ihnen enthaltene strahlende Energie wird in Wärme verwandelt. Die so erwärmte Erdoberfläche gibt einen Teil dieser Energie an die über ihr lagernden Luftschichten ab, sie erwärmen sich und steigen in die Höhe. So entstehen die gewaltigen Luftströmungen, welche die klimatischen Verhältnisse der Erde regeln, die als Winde dem Schiffer die Segel schwellen und dem Müller die Mühle treiben, die aber auch als Orkane ganze Städte zu vernichten und die Baumriesen des Urwaldes zu knicken vermögen. An der Oberfläche des Meeres peitschen die Winde das Wasser und erregen die gewaltigen, oft Verderben bringenden Wellen des Ozeans. Die regelmäßigen Winde, die in vielen Gegenden des Weltmeeres vorherrschen, setzen das Wasser allmählich in immer größeren und größeren Tiefen in Bewegung und erzeugen so die großen regelmäßigen Meeresströmungen, die neben den Luftströmungen den wichtigsten Faktor für die Regelung der klimatischen Verhältnisse der Erde darstellen. Und wenn wir in unseren Gegenden uns eines wesentlich milderen und fruchtbareren Klimas erfreuen, als es in den gleichen Breiten von Nordamerika herrscht, so verdanken wir das der Fürsorge der Mutter Sonne, welche den Golfstrom in Bewegung setzt und uns so einen Teil der Wärme, den sie uns nicht direkt zustrahlen kann, durch die ihr dienstbaren Geister des Wassers zuführt. Mit der Luft zugleich hebt die Sonne gewaltige Wassermengen in die Höhe, welche sie an der Oberfläche der irdischen Gewässer durch die Kraft ihrer Strahlung zur Verdunstung bringt. Der so entstandene Wasserdampf kondensiert sich dann zu Wolken, schlägt sich als Regen nieder und schafft die Grundbedingungen für die Vegetation und alles tierische Leben. Ein Teil der Niederschläge speist die Quellen der Bäche und Ströme, und so wird die Kraft, die wir in Wasserfällen und schnellströmenden Flüssen zu mannigfacher nützlicher Arbeit verwenden, dadurch dem Wasser verliehen, daß es durch die Wirkung der Sonnenstrahlen auf große Höhen gehoben und in den Stand gesetzt wird, beim Herabfallen wieder Arbeit zu leisten. Alle diese Naturkräfte stellen also eine unmittelbare Umwandlung der Arbeitskraft dar, welche vorher in den Sonnenstrahlen in Form strahlender Energie vorhanden war, und sie alle würden aufhören und versiegen, wenn sie nicht dauernd von der Sonne gespeist und erhalten würden.

Aber auch das organische Leben zieht seine Kraft unmittelbar aus der Sonne. In den Pflanzenzellen wird der Kohlenstoff assimiliert, d. h. er wird aus der Kohlensäure der Luft reduziert und in Form von organischen Verbindungen in den Körper der Pflanzen übergeführt. Zur Reduktion der Kohlensäure ist chemische Arbeit nötig, und diese wird von den Sonnenstrahlen geleistet, welche in der Pflanzenzelle absorbiert werden. Die in den Pflanzen aufgespeicherten organischen Stoffe sind es auch, aus denen die Tiere direkt oder indirekt ihre Nahrung ziehen, und die Wärme, die Tiere und Menschen beim Lebensprozeß verbrauchen, entsteht lediglich durch die Verbrennung der Kohlenstoffverbindungen, die sie aus den Pflanzen aufgenommen haben und die in der Pflanzenzelle durch die Kraft der Sonnenstrahlen gebildet worden sind. Andererseits sind aus den Pflanzenkörpern im Laufe der Jahrtausende zum Teil große Kohlenlager geworden, und wenn wir diese jetzt ausnutzen und die Kohle verbrennen, um unsere Wohnungen zu heizen und die wichtigste Triebkraft für unsere industriellen Unternehmungen zu gewinnen, so ist die Wärme, die wir damit nutzbar machen, in der Energie der Sonnenstrahlen enthalten gewesen und vor Jahrtausenden mit diesen Strahlen zur Erde gelangt. Wenn diese Kohlenvorräte einst aufgezehrt sein werden, so werden unsere Nachfahren höchstwahrscheinlich dazu übergehen müssen, die Sonnenstrahlung direkt zur Heizung ihrer Wohnungen und zum Betrieb ihrer Werkstätten zu benutzen.

IV. Sonnentheorien. Schon aus der kurzen hier gegebenen Übersicht über die wichtigsten auf der Sonne beobachteten Erscheinungen geht wohl zur Genüge hervor, wie ungeheuer das Forschungsmaterial ist, das im Laufe der Zeit zusammengetragen worden ist. Wir wollen jetzt noch kurz die Versuche betrachten, die gemacht worden sind, um die Gesamtheit der Beobachtungstatsachen möglichst zu einem einheitlichen Bilde zu vereinigen. Das ist freilich nur sehr unvollständig gelungen, und man muß sagen, daß das Ziel immer entfernter erscheint, je mehr Einzeltatsachen von der Sonne bekannt werden. Besonders erschwert wird die Aufgabe dadurch, daß wir uns auf das Studium der Photosphäre und der darüberliegenden Schichten beschränken müssen, der ganze gewaltige Sonnenball innerhalb der Photosphäre ist unserer Beobachtung entzogen.

Ältere Anschauungen.

Die von den älteren Naturforschern vertretene Ansicht über das Wesen der Sonne fußte auf der Beobachtung der Sonnenflecke und schuf sich das Bild der Sonne nach dem Vorbild der Erde. Sie geht wohl auf Dominicus Cassini (um 1670) zurück. Nach ihm besteht die Sonne aus einem dunklen festen Kern, der von einem Lichtozean, der uns sichtbaren Sonnenscheibe, umgeben ist. Die Sonnenflecke erklären sich dadurch, daß die obere Schicht dieses Ozeans stellenweise infolge gewaltsamer Bewegungen zerreißt und den Ausblick auf die Berggipfel des dunklen Kerns eröffnet. Die Annahme des dunklen Sonnenkerns wurde endgültig erst durch die Resultate der Spektralanalyse beseitigt. Diese führte zu der Anschauung, daß rings um

Kirchhoffs Theorie.

die wie ein fester oder flüssiger Körper weißleuchtende Photosphäre eine Schicht glühender Gase sich befindet, ebenso wie die feste Erdkugel von einer gasförmigen Atmosphäre umgeben ist. Die äußeren Bedingungen allerdings sind in beiden Fällen sehr verschieden, die Temperatur ist an der Sonnenoberfläche, wie man aus der blendenden Helligkeit unmittelbar ersieht, eine so hohe, wie wir sie mit unseren irdischen Hilfsmitteln überhaupt nicht zu erreichen vermögen, und auch der Druck und die Dichte der Atmosphäre kann in der Photosphäre von ganz anderer Größenordnung sein als an der Erdoberfläche. Auch ihre chemische Zusammensetzung ist eine ganz andere. Die Sonnenatmosphäre besteht nicht aus atmosphärischer Luft, sondern aus einem Gemisch sehr zahlreicher Elemente in gasförmigem Zustande, die nach unseren Kenntnissen nur bei sehr hohen Temperaturen in diesem Zustande bestehen können. Das ist die Grundanschauung von der Konstitution der Sonne, wie sie Kirchhoff 1861 entwickelt hat. Er führte auch im einzelnen die Analogie zwischen Erd- und Sonnenatmosphäre weiter. Wie in der Erdatmosphäre lokale Temperaturerniedrigungen eintreten, die zur Wolkenbildung führen, so werden auch in der Sonnenatmosphäre stellenweise sich Wolken bilden, die allerdings nicht aus Wassertropfen bestehen, sondern aus Tropfen derjenigen Elemente, deren Siedepunkt am höchsten liegt. Auf diese Weise erklärt Kirchhoff die Bildung der Sonnenflecke.

Zöllners Theorie.

Nach Zöllner soll das, was wir gewöhnlich als Photosphäre erblicken, nicht die Oberfläche der feuerflüssigen Sonnenkugel sein, sondern eine in einiger Entfernung darüber lagernde Wolkenschicht. Nur manchmal entstehen Öffnungen in der Wolkenschicht, und dann kühlen sich die darunter befindlichen Stellen der Sonnenoberfläche durch Ausstrahlung so weit ab, daß sich auf dem feurigen Meere feste Substanzen, Schlacken, bilden, welche die Kerne der Sonnenflecke bilden sollen. Die Höfe sind Kondensationswolken, die in gewisser Höhe darüber die Küsten dieser Schlackeninseln umgeben sollen.

Die Sonne als Gasball.

Die Annahme eines festen oder flüssigen Sonnenkerns ist nur schwer mit dem für die mittlere Dichte der Sonne gefundenen Werte zu vereinigen, der, wie wir gesehen haben, nur etwa ein Viertel der mittleren Dichte der Erde beträgt. Außerdem ist es sehr wahrscheinlich, daß die Temperatur der Sonne höher liegt als die kritische Temperatur aller irdischen Stoffe, d. h. diejenige Temperatur, oberhalb deren auch die allergrößten Drucke nicht genügen, um die Substanz aus dem gasförmigen in den flüssigen oder festen Zustand überzuführen. So kam es, daß bald nachdem Andrews seine grundlegenden Versuche über den kritischen Zustand der Kohlensäure bekannt gegeben hatte, Frankland und Lockyer sowie Secchi die alte Annahme des feuerflüssigen oder festen Sonnenkerns aufgaben und zu der Anschauung übergingen, daß wir den Sonnenkern als gasförmig, die Sonne also im wesentlichen als einen ungeheuren Gasball zu betrachten haben. Diese Ansicht ist wohl jetzt ganz allgemein angenommen. Nur über die Frage nach dem Ursprung des weißen Lichts der Photosphäre herrscht noch Uneinigkeit.

Das weiße Licht der Photosphäre.

Viele Forscher sind der Ansicht, daß die Gase unter so hohen Drucken, wie sie im Sonneninnern infolge der Gravitation herrschen müssen, ebenso wie feste und flüssige Körper ein kontinuierliches Spektrum aussenden, und diese Ansicht wird nicht bloß durch eine Reihe experimenteller Untersuchungen gestützt, sondern sie folgt auch aus den physikalischen Anschauungen über das Wesen der Lichtemission. Andererseits ist vielfach die Ansicht ausgesprochen worden, daß die Photosphäre eine Unterbrechung in dem Gasozeane der Sonne darstellt und aus einer zusammenhängenden Wolkenschicht besteht, zusammengesetzt aus kleinen Tropfen der am schwersten verdampfbaren Elemente.

Schmidtsche Sonnentheorie.

Wenn wir von dieser durch nichts gebotenen Annahme absehen und die Sonne als einheitlichen Gasball betrachten, so müssen in ihm Druck und Temperatur von innen nach außen kontinuierlich abnehmen. Es wäre also zu erwarten, daß die Sonnenscheibe am Rande ganz allmählich an Helligkeit abnimmt und stetig in den dunklen Himmel übergeht. So entsteht die große Schwierigkeit, die Erscheinung des scharf begrenzten Sonnenrandes zu erklären.

Der erste, der diese Schwierigkeit deutlich erkannt und der zugleich einen Weg angegeben hat, sie zu überwinden, war August Schmidt (1891). Die Schmidtsche Sonnentheorie beruht auf der den Astronomen wohlvertrauten Erscheinung der astronomischen Refraktion. Infolge der von oben nach unten zunehmenden Dichte der Erdatmosphäre verfolgt das Licht in ihr nicht geradlinige, sondern gekrümmte Bahnen, und das gleiche muß auch in der Sonnenatmosphäre eintreten. Aus dieser Strahlenkrümmung konnte Schmidt unter gewissen Annahmen über das Dichtegefälle auf der Sonne ableiten, daß dem außenstehenden Beobachter der Sonnenrand scharf begrenzt erscheinen muß, auch wenn die Helligkeitsabnahme von dem weißleuchtenden Sonnenkern zu den nur schwach mit einem Linienspektrum leuchtenden Schichten der äußeren Sonnenatmosphäre ganz stetig und allmählich erfolgt. Im Lichte dieser Theorie erscheint der Sonnenrand nicht als reale Grenze zwischen zwei ganz verschieden leuchtenden Teilen der Sonne, sondern als optische Täuschung, hervorgebracht durch die Strahlenbrechung auf der Sonne. Der Durchmesser des weißleuchtenden Teils erscheint dabei bedeutend vergrößert, und so würde sich die geringe mittlere Dichte der Sonne daraus erklären, daß man ihr Volumen infolge der optischen Täuschung früher zu groß angenommen hat. Vom geometrisch-optischen Standpunkt ist die Schmidtsche Theorie vollständig einwandfrei, dagegen sind Bedenken berechtigt, ob das Resultat nicht durch die Absorption der Lichtstrahlen in der Sonnenatmosphäre ganz oder zum Teil illusorisch gemacht wird.

Schwarzschilds Erklärung des scharfen Sonnenrandes.

Sehr viel einfacher erklärt Schwarzschild die Erscheinung des scharfen Sonnenrandes. Wenn wir die Sonne als eine Gaskugel auffassen, so können wir die Gesetze der Thermodynamik auf sie in der einfachen und wohlbekannten Form anwenden, die sie für Gase annehmen. Durch solche thermodynamische Betrachtungen kommt Schwarzschild 1906 zu dem Resultat, daß

bei einer derartigen Gaskugel Temperatur und Dichte ganz außerordentlich schnell von innen nach außen abnehmen müssen. Nach ihm ist zu erwarten, daß auf eine Niveaudifferenz von 30 km eine Abnahme der Temperatur von etwa 10000^0 auf 5300^0 und der Dichte von 18,5 auf 0,5 stattfindet. Da die Helligkeit der kontinuierlichen Lichtemission mit zunehmender Temperatur und Dichte ganz enorm steigt, so muß der Abfall der Helligkeit von innen nach außen noch viel rapider vor sich gehen, so daß bei der starken Verkleinerung, unter der wir alle Sonnenphänomene beobachten, der Übergang von der weißleuchenden Sonnenscheibe zur äußeren Atmosphäre als plötzlich und diskontinuierlich erscheinen muß. Bei dieser Theorie stößt jedoch die Erklärung der geringen mittleren Dichte der Sonne auf Schwierigkeiten.

Emdens Theorie.

Besonders eingehend hat sich Emden mit der Anwendung der Thermodynamik auf die Theorie des gasförmigen Sonnenballs beschäftigt. Er leitet unter Berücksichtigung der Sonnenrotation her, daß sich, zumal in den äquatorialen Gegenden der Sonne, häufig Wirbel bilden müssen, die in der Tiefe beginnend sich nach außen hin fortpflanzen. Schon viele ältere Beobachter, wie Faye, Reye und Spörer, hatten die Ansicht vertreten, daß die Sonnenflecke als Wirbelbewegungen aufzufassen sind, und so sieht auch Emden in den von ihm theoretisch abgeleiteten Wirbeln die Ursache der Sonnenflecke. Viele Forscher haben die Bildung der Sonnenflecke auf absteigende Strömungen in der Sonnenatmosphäre zurückgeführt. Da jeder Wirbel in der Richtung seiner Achse eine Saugwirkung ausübt, so muß sich über ihm in der Atmosphäre eine absteigende Strömung bilden, und so würde auch diese Theorie der Fleckenbildung mit der Emdenschen Wirbeltheorie im Einklang sein. Auch die charakteristische Verteilung der Flecke auf der Sonne vermag Emden aus seiner Theorie herzuleiten, dagegen ist es weder ihm noch anderen gelungen, die Periodizität der Sonnentätigkeit in befriedigender Weise zu erklären.

Eddingtons Sonnentheorie

Den letzten größeren Fortschritt in der Sonnentheorie verdanken wir den Untersuchungen von A. S. Eddington über das Strahlungsgleichgewicht der Sterne. Um für jeden Punkt im Innern des ungeheuren Gasballes den Wert der drei den Zustand des Gases bestimmenden Größen Druck, Temperatur und Dichte ermitteln zu können, müssen uns drei physikalische Gesetze gegeben sein, die diese Größen verknüpfen. Das erste ist das für ideale Gase geltende Gesetz von Mariotte und Gay-Lussac oder besser die allgemeiner gültige Van der Waals'sche Zustandsgleichung. Als zweites Gesetz hatte zuerst Schwarzschild (1906) das Gleichgewicht der Strahlung nach dem Kirchhoffschen Satze herangezogen: jedes Teilchen muß im Gleichgewichtszustande ebensoviel Energie abgeben, wie es von seiner Umgebung empfängt. Als drittes Gesetz hatte man früher stets das des mechanischen Gleichgewichts benutzt, nach welchem der innere Druck des Gases an jeder Stelle gleich dem Gewicht der über dem betreffenden Raumteile befindlichen Massen ist. Zwar war schon mehrfach darauf hingewiesen worden, daß im Innern der Sonne auch der schon bei der Theorie der Kometen-

schweife (S. 312) erwähnte Strahlungsdruck von großer Bedeutung sein müsse, aber erst Eddington führte 1916 dessen Berücksichtigung streng durch und konnte so die Druck- und Temperaturverhältnisse im Innern der Fixsterne aus den uns zugänglichen Beobachtungsgrößen Masse, mittlerer Dichte und Oberflächentemperatur theoretisch ableiten.

Theorie der Protuberanzen.

Großen Schwierigkeiten ist das Verständnis der Protuberanzen mit ihren ungeheuren Geschwindigkeiten begegnet. Man hat sie früher ziemlich allgemein für gewaltige, aus dem Sonneninnern kommende Gaseruptionen gehalten. Wie sollen diese aber zustande kommen? Explosionen, welche durch plötzliche Auslösung chemischer, unter großer Energieentwicklung verlaufender Umsetzungen entstehen, sind in dem Gasozean der Sonne wohl ausgeschlossen. Es bliebe also nur die Annahme plötzlicher Ausdehnung übrig, welche durch gewaltige lokale Temperatursteigerung hervorgebracht wird. Damit so z. B. der Wasserstoff eine Geschwindigkeit von 200 km gewinnen sollte, müßte, wie sich leicht berechnen läßt, die Temperatur 4800000° C betragen, wovon doch in den äußeren Schichten der Sonne keine Rede sein kann. Und selbst wenn man etwas Derartiges annehmen wollte, bliebe noch der häufig beobachtete plötzliche Wechsel in der Größe und Richtung der Protuberanzenbewegung unerklärlich. Ein Verständnis für diese Erscheinungen bietet sich nur auf Grund der Auffassung, daß es sich bei den Protuberanzen um ionisierte, d. h. elektrisch geladene leuchtende Gase handelt. Solche ionisierte Gase sind es, die in den Goldsteinschen Kanalstrahlen leuchten und unter dem Einfluß elektrischer Felder mit großer Geschwindigkeit sich bewegen, wie Stark durch die Linienverschiebung nach dem Dopplerschen Prinzip nachgewiesen hat. In der Sonnenatmosphäre haben wir vielfache Ursachen, die eine Ionisation der Gase hervorrufen müssen, hohe Temperatur, starke ultraviolette Strahlung und höchst wahrscheinlich auch Kathodenstrahlen, und durch die Haleschen Versuche über den Zeemaneffekt ist die Anwesenheit ionisierter Gase in den Sonnenflecken mit aller Sicherheit nachgewiesen. Wenn wir die Protuberanzen als ionisierte Gasströme betrachten, so lassen sich die beobachteten ungeheuren Geschwindigkeiten und der rasche Wechsel der Bewegung durch den Einfluß elektrischer und magnetischer Felder sehr leicht erklären.

Theorie der Korona.

Für die Beschaffenheit der Korona wird aus dem spektralanalytischen Befunde gewöhnlich gefolgert, daß sie als ein Gemisch von leuchtenden Gasen anzusehen ist, die die hellen Koronalinien aussenden, und von festen oder flüssigen Teilchen, von denen das reflektierte Sonnenlicht und das kontinuierliche Eigenlicht ausgehen. Diese Teilchen werden, um das Eigenlicht zu erklären, meistens als glühend angesehen. Es ist aber auch nicht ausgeschlossen, daß das kontinuierliche Spektrum und das Linienspektrum Fluoreszenzspektra der Koronagase sind. Über die Herkunft der festen oder flüssigen Teilchen sind zwei verschiedene Ansichten möglich, entweder sie entstammen der Sonne und sind Kondensationsprodukte großer gasförmiger Strömungen, oder sie sind meteorischen Ursprungs und entstammen den

meteorischen Massen, die sich im Weltenraum finden. Zweifellos ist die Gasatmosphäre in der Korona ganz außerordentlich verdünnt, und es entsteht die Frage, wie sich feste oder flüssige Teilchen in ihr schwebend erhalten können trotz der gewaltigen von der Sonne ausgehenden Gravitation. Fast alle Forscher, die sich mit dieser Frage beschäftigt haben, sind zu der gleichen Ansicht gekommen, daß eine Repulsivkraft von der Sonne ausgehen muß, die der Attraktion das Gleichgewicht hält. Diese Repulsivkraft zeigt sich auch deutlich in der Einwirkung der Sonne auf die Kometen. Über die Natur dieser Kraft haben die Anschauungen gewechselt; man hat früher vielfach angenommen, daß es sich um eine elektrische Abstoßung handelt, neuerdings aber ist es wohl das Wahrscheinlichste, daß die wirkende Kraft der von Maxwell zuerst theoretisch gefundene, von Lebedew direkt experimentell nachgewiesene Lichtdruck ist. Durch ihre Strahlung selbst übt die Sonne, wie jede Strahlungsquelle, auf die Oberfläche der bestrahlten Körper einen Druck aus, der zwar in den meisten Fällen gegen die Gravitation verschwindend klein ist, aber einen verhältnismäßig bedeutenden Wert bei sehr kleinen Teilchen erreichen kann, bei denen das Verhältnis der Oberfläche zur Masse groß ist. Arrhenius hat durch Kombination dieses Lichtdrucks mit der Annahme einer elektrischen Ladung der Sonne eine sehr geistreiche Theorie aufgestellt, die er nicht bloß auf die Korona, sondern auch auf eine große Zahl anderer kosmischer Probleme angewendet hat. Er hat unter der Annahme, daß die Teilchen der Korona gerade so groß sind, daß Schwere und Strahlungsdruck sich das Gleichgewicht halten, das Gesamtgewicht der Korona auf 12000000 Tonnen berechnet, das ist nicht mehr als das Gewicht von 400 unserer größten Ozeandampfer. Das würde etwa mit der Schätzung von Newcomb übereinstimmen, der meinte, daß in der Korona vielleicht bloß 1 Staubkorn auf das Kubikkilometer kommt. Ebenso muß auch der Druck der in der Korona enthaltenen Gase ganz minimal sein. Je mehr wir aber in ihr nach unten steigen und, ganz allgemein, je mehr wir uns der Mitte der Sonne nähern, desto mehr müssen Druck und Dichte in der Sonnenatmosphäre zunehmen, und diese Zunahme findet nach den thermodynamischen Sonnentheorien ganz außerordentlich schnell statt.

Repulsivkraft der Sonne.

Druck und Dichte in der Sonnenatmosphäre.

Von besonderem Interesse sind die Zustände in der Chromosphäre und ihrer tiefsten Schicht, der umkehrenden Schicht. Da die Chromosphäre selbst eine Ausdehnung von 7000 bis 11000 km hat, so müssen in ihren verschiedenen Schichten sehr verschiedene Drucke herrschen, und auch in der umkehrenden Schicht, deren Dicke etwa 1000 km beträgt, würde der Druck nach den Rechnungen Emdens noch von 13 bis 1 Atm. variieren. Das stimmt mit neueren Messungen über den Zusammenhang zwischen Druck und Verschiebung der Spektrallinien überein, aus denen für die umkehrende Schicht ein Druck von 2 bis 7 Atm. für die verschiedenen beobachteten Spektrallinien folgt. Im Gegensatz hierzu kommt Gouy auf Grund spektralanalytischer Betrachtungen zu dem Schluß, daß der Druck an der Sonnenoberfläche nur etwa ein Tausendmilliontel Atm. beträgt. Man hat oft die Ansicht aus-

geprochen, daß die verschiedenen Gase der Sonnenatmosphäre im wesentlichen übereinander geschichtet sind, so daß die schwersten Gase nur in der Tiefe, die leichtesten bis zu den größten Höhen vorkommen. Danach müßten die Elemente nach dem Atomgewicht angeordnet sein. Das wird aber durch die Beobachtungen nicht gestützt.

Juliussche Theorie.

Von ganz anderer Grundlage als alle Anderen geht Julius in seiner Theorie der Sonne aus. Er betrachtet alle Sonnenphänomene, bei denen wir helle Linienspektren beobachten, als hervorgebracht nicht durch die Emission, sondern durch die anomale Dispersion der glühenden Gase. So gelangt er zu einer Theorie, die in sehr einfacher Weise und auf Grund einer einheitlichen, physikalisch wohlfundierten Anschauung einen großen Teil der auf der Sonne beobachteten Erscheinungen wenigstens in den allgemeinen Zügen zu erklären vermag. Die gasförmigen Elemente der Sonnenatmosphäre prägen den mit kontinuierlichem Spektrum leuchtenden Strahlen der Photosphäre nicht bloß durch Absorption die dunklen Fraunhoferschen Linien ein, sondern sie lenken auch an Stellen örtlich wechselnder Dichte durch anomale Dispersion dasjenige Photosphärenlicht, das im Spektrum in unmittelbarer Nähe der Absorptionslinien liegt, von seinem regelmäßigen Wege ab. So bringen sie nach Julius die hellen Spektralerscheinungen des Flashphänomens und der Chromosphäre durch das stets vorhandene regelmäßige Dichtegefälle, die der Protuberanzen durch sporadisch auftretende, besonders große Dichtigkeitsunterschiede hervor. Die Fraunhoferschen Linien selbst werden nach Julius ebenso wie nach der Kirchhoffschen Anschauung im wesentlichen durch Absorption hervorgebracht, nur die Verbreiterung, welche einige dieser Linien stets, andere nur unter besonderen Verhältnissen, wie z. B. in Sonnenflecken, zeigen, wird durch anomale Dispersion und Diffraktion erklärt. Während die hellen Spektrallinien da, wo sie auf der Sonne zu sehen sind, nach der älteren Anschauung das Vorhandensein der entsprechenden Elemente in gasförmig leuchtendem Zustande verkünden, zeigen sie nach Julius an, daß die stets in der ganzen Sonnenatmosphäre vorhandenen gasförmigen Elemente an diesen Stellen ein starkes Dichtegefälle besitzen. Die ungeheuren Geschwindigkeiten der Protuberanzen reduzieren sich dabei auf rasch fortschreitende Änderungen dieses Dichtegefälles. Alle diese Erscheinungen stellen also nicht lokale Anhäufungen bestimmter chemischer Elemente dar, sondern nur Druckgebiete in der im wesentlichen als ein nahezu homogenes Gemisch aller auf der Sonne vorhandenen Gase anzusehenden Sonnenatmosphäre. Wie in der Erdatmosphäre barometrische Maxima und Minima, Dichtegefälle und Wirbelbewegungen eintreten, so wird das auch in der Sonnenatmosphäre der Fall sein, und die Gebiete dieser atmosphärischen Stürme sind es, die uns als Sonnenflecke, Fackeln und Protuberanzen erscheinen. Diese Stürme aber sind regelmäßiger verteilt als in der Erdatmosphäre, weil die Luftströmungen nicht wie auf der Erde durch den Wechsel von Tag und Nacht, Sommer und Winter verändert, durch Berge und Täler gehindert und durch ungleiche Strah-

lungseigenschaften der verschiedenen Teile der Oberfläche beeinflußt werden. Für die spektroheliographischen Bilder gelangt man merkwürdigerweise auch nach der Juliusschen Theorie zu dem Ergebnis, daß sie im großen und ganzen in derselben Weise die Zustände verschiedener Höhenniveaus darstellen, wie es Hale und Deslandres annehmen.

Auch die Juliussche Theorie vermag keineswegs alle Einzelheiten der Sonnenphänomene zu erklären, auch ihr stehen große Schwierigkeiten entgegen, die gerade an denjenigen Punkten einsetzen, in denen die ältere Anschauungsweise den Erscheinungen sehr gut gerecht wird, während diejenigen Beobachtungen, die den älteren Theorien zu der Zeit, als Julius seine Theorie aufstellte, noch besonders große, inzwischen allerdings zum größten Teil überwundene Schwierigkeiten bereitet haben, sich nach Julius sehr leicht verstehen lassen. Die Entscheidung zwischen den beiden großen Erklärungsprinzipien — Emission und Dopplersches Prinzip einerseits, anomale Dispersion und Strahlenbrechung andererseits — dürfte wohl so ausfallen, daß beide bei den Sonnenphänomenen mitwirken, so daß die im allgemeinen durch die einfachen Gesetze der geometrischen Optik, der Strahlenbrechung und des Dopplerschen Prinzips bestimmten Erscheinungen unter gewissen Bedingungen auch durch die anomale Dispersion noch beeinflußt werden können. Bisher haben alle in dieser Richtung namentlich auf dem Mt. Wilson in Kalifornien angestellten Beobachtungen noch keinen sicher nachweisbaren Einfluß der anomalen Dispersion ergeben. Es bleibt nach wie vor die Hauptaufgabe der Sonnenphysik, die Beobachtungen so genau wie möglich durchzuführen und durch neue Beobachtungsmethoden neue Resultate zu gewinnen. Was feststeht und die Veränderung der Zeiten überdauert, das sind gut beobachtete Erfahrungstatsachen, die Theorien entstehen und vergehen wie die Blätter der Bäume und die Geschlechter der Menschen.

Literatur.

Von zusammenfassenden Werken und Abhandlungen, die sich speziell mit der Sonne beschäftigen, seien genannt:

A. SECCHI, Die Sonne. Deutsche Ausgabe (Braunschweig, 1872).

C. A. YOUNG, Die Sonne (Leipzig, 1883).

E. PRINGSHEIM, Vorlesungen über die Physik der Sonne (Leipzig, 1910). Hier ist die Literatur bis zum Jahre 1909 sehr eingehend zitiert.

H. DESLANDRES, Histoire des idées et des recherches sur le soleil (Paris, 1906).

J. BOSLER, Les théories modernes du soleil (Paris, 1910; mit vielen Literaturnachweisungen).

CH. G. ABBOT, The sun (London und New York, 1911).

W. H. JULIUS, Physik der Sonne. Handwörterbuch der Naturwissenschaften (Jena, 1912).

Für die neueste Literatur kommen außer den allgemeinen wissenschaftlichen und astronomischen Zeitschriften besonders in Betracht:

Astrophysical Journal und Contributions from the Mt. Wilson solar observatory.

PHYSIK DER FIXSTERNE.

Von

P. Guthnick.

I. Begriff des Fixsternes. Fixsterne, stellae fixae, werden von alters her diejenigen Gestirne des Himmels genannt, die ihre gegenseitige Stellung nicht augenfällig verändern. Den Gegensatz bilden die Planeten, in wörtlicher Übersetzung „Wandelsterne“ (πλανάομαι, ἀστὴρ πλανήτης). Obwohl man im gegebenen Falle niemals lange im Zweifel sein wird, ob man es mit einem Fixstern oder mit einem Planeten zu tun hat, so ist es doch nicht leicht, eine scharfe, nicht zu enge, d. h. allen Zukunftsmöglichkeiten Rechnung tragende, Definition des Begriffes Fixstern zu geben. Gerade die Eigenschaft, die den Namen veranlaßt hat, die scheinbare Unbeweglichkeit, trifft in Strenge nicht zu, ja es sind in neuerer Zeit Fälle von derart großen Eigenbewegungen unter den Fixsternen bekannt geworden, daß man sich wohl vorstellen könnte, wie bei einer etwa noch eintretenden wesentlichen räumlichen Erweiterung unserer Kenntnis des Sonnensystems über den zurzeit äußersten Planeten Neptun hinaus das Kriterium der Eigenbewegung versagen würde. So hat ein vor kurzem von Barnard entdeckter schwacher Stern der Helligkeit 9.4^m im Ophiuchus eine scheinbare jährliche Eigenbewegung von 10.4″ bei einer Parallaxe von 0.50″. In die Entfernung des uns noch näher stehenden Fixsternes α Centauri, dessen Parallaxe 0.76″ beträgt, versetzt, würde dieser Schnelläufer im Ophiuchus eine jährliche Eigenbewegung von 16″ zeigen. Der Stern μ Cassiopeiae würde in dieser Entfernung 25″, der Stern Groombridge 1830 sogar über 40″ Eigenbewegung haben. Es ist nach den bisherigen Erfahrungen anzunehmen, daß unter den schwachen Sternen (unter 9^m) noch mancher Fall sehr großer Eigenbewegung der Entdeckung harrt, da in der Gegend des Fixsternsystems, in der die Sonne sich befindet, eine nicht kleine Zahl absolut sehr lichtschwacher Sterne vorhanden zu sein scheint, die zum Teil mit beträchtlicher Geschwindigkeit den Raum durchziehen. Andererseits würde ein Mitglied des Sonnensystems, dessen mittlerer Abstand von der Sonne z. B. das 20fache der Neptunentfernung betrüge — der Abstand des Sternes α Centauri ist gleich 9000 Neptunentfernungen — eine mittlere jährliche Eigenbewegung von nur noch 88″ besitzen. Dieselbe würde aber überlagert werden von einer beträchtlich größeren jährlichen parallaktischen Bewegung von $5\frac{1}{2}'$ Amplitude, die das Objekt trotz-

Das Kriterium der Eigenbewegung.

dem sogleich als zum Sonnensystem gehörend bezeichnen würde. Ein Planet von der Größe und Reflexionsfähigkeit (Albedo) des Neptun würde in dieser Enfernung schwächer als 20. Größe sein, also zu den lichtschwächsten uns noch zugänglichen Objekten gehören. Über die Fixsterne dieser Helligkeit wissen wir aber noch so gut wie nichts, und es kann durchaus nicht als ausgeschlossen gelten, daß Sterne so geringer scheinbarer Helligkeit in der näheren Umgebung der Sonne sich befinden, deren Eigenbewegungen Beträge erreichen, die dem für den obigen hypothetischen Planeten erhaltenen Wert nahekommen.

Eigenlicht keine wesentliche Eigenschaft der Fixsterne.

Sowenig die Eigenschaft, nur im erborgten Sonnenlicht zu leuchten, als charakteristisch für einen Planeten angesehen werden kann — einen selbstleuchtenden Jupiter würden wir trotzdem Planet nennen —, so wenig kann das Selbstleuchten als eine wesentliche Eigenschaft der Fixsterne bezeichnet werden, wie schon Bessel im Zusammenhang mit der Entdeckung der unsichtbaren Begleiter von Sirius und Procyon hervorhob. Vielmehr werden wir alle Grade des Leuchtens von der physikalisch möglichen Höchstgrenze bis herab zur völligen Dunkelheit im Reiche der Fixsterne als vorhanden annehmen müssen. Der physikalische Zustand ist überhaupt nebensächlich; wir müssen alles zum Reich der Fixsterne rechnen, was sich praktisch außerhalb der Anziehungssphäre der Sonne befindet, also z. B. auch die Gasnebel, mögen sie nun als eine embryonale Entwicklungsstufe der Fixsterne betrachtet werden oder als Gebilde, die ihren eigenen, von dem der Fixsterne ganz verschiedenen Werdegang haben. Die Sonne selbst ist einer unter den vielen Millionen Fixsternen, durch nichts vor den übrigen besonders ausgezeichnet als durch ihre geringe Entfernung von uns, die uns ihre genaue Erforschung ermöglicht.

Definition des Fixsternbegriffs auf Grund der Parallaxe.

Wir erkennen demnach die Entfernung von der Sonne als das einzige Kriterium für die Zugehörigkeit eines Gestirnes zu dem Gebiet, das hier betrachtet werden soll. Daß überhaupt eine Trennung zwischen dem Sonnensystem und dem übrigen Weltall vollzogen wird, hat übrigens nicht sowohl physikalische Gründe, als rein praktische gehabt. Die Bewegungsverhältnisse innerhalb des Sonnensystems sind für uns so grundverschieden von denen des Fixsternsystems, daß diese Trennung durchaus gerechtfertigt ist. Andererseits aber sind die Ziele und Methoden der physischen Erforschung der Sonne und der Planeten verschieden genug von denen der Fixsternforschung, um auch ihretwegen eine Scheidung geboten erscheinen zu lassen. Da der Sonne ein besonderer Abschnitt eingeräumt ist, so wird sie hier nur als ein Stern unter vielen behandelt werden.

Wesentliche Beschränkung der Forschung auf selbstleuchtende Objekte. Anzeichen dunkler Massen.

Die überaus große Entfernung, in der, von der Sonne abgesehen, alle Fixsterne sich von uns befinden, bewirkt, daß die vorhin als nicht wesentlich bezeichnete Eigenschaft des Selbstleuchtens praktisch dennoch von ausschlaggebender Bedeutung ist. In der Tat haben wir in verhältnismäßig nur sehr wenigen Fällen Kenntnis auch von solchen Massen im Weltraum, die nicht in eigenem Licht oder doch so schwach leuchten, daß wir sie nicht

sehen oder auf der photographischen Platte sichtbar machen können. Die Sonne z. B., deren Helligkeit von der Erde aus gesehen in der für die Fixsterne gebräuchlichen Größenskala ausgedrückt -27.0^m beträgt, würde von α Centauri aus gesehen einem Stern der Helligkeit 0.2^m (Arkturus) gleichen; der Planet Jupiter, der sein Licht von ihr erhält, würde in der für seine Sichtbarkeit günstigsten Stellung zur Sonne als halbbeleuchtete Scheibe nur 22.—23. Größe sein. Hätte Jupiter denselben Durchmesser wie die Sonne, so würde seine Helligkeit 17.—18. Größe sein. Sein scheinbarer Abstand von der Sonne wäre aber nur 4″. Es ist zweifelhaft, ob ein solches Objekt in der Nähe eines so hellen Sternes mit den heutigen instrumentellen Mitteln noch sichtbar gemacht werden könnte. Man sieht also, daß im allgemeinen Massen, die nicht in eigenem Licht leuchten, in den Entfernungen der Fixsterne nicht mehr sichtbar sein werden. Da aber das Licht in der Tat der einzige Bote ist, der uns Nachricht von der Materie und ihrem Zustande draußen im Weltraum zu übermitteln vermag, so bleibt als einzige Möglichkeit in einem solchen Falle die Nähe einer selbstleuchtenden Masse, die uns die Anwesenheit der dunkeln Masse durch deren Anziehungswirkung oder auf irgendeine andere Weise verrät, wenn die Wirkung groß genug ist, um mit unseren Beobachtungsmitteln erkannt zu werden. Jupiter erteilt der Sonne eine Geschwindigkeit von nur 0.013 km/sek, ein Betrag, den wir in keiner Weise feststellen könnten, wenn wir die Sonne aus Fixsternentfernung beobachten müßten. Jedenfalls muß im allgemeinen die unsichtbare dunkle Masse ungefähr von derselben Größenordnung sein wie die sichtbare helle, um auf diesem Wege nachweisbar zu sein. Ein solcher Fall lag bei Sirius und Procyon vor, als man ihre lichtschwachen und nahen Begleiter noch nicht direkt wahrnehmen konnte. Weitere Beispiele der Art liefern die spektroskopischen Doppelsterne mit nur einer im Spektrum sichtbaren Komponente, ferner einige visuelle Doppelsterne mit periodischen Abweichungen von der reinen elliptischen Bahnbewegung. Natürlich folgt aus der Tatsache der Nichtwahrnehmbarkeit in diesen Fällen noch nicht, daß die unsichtbaren Massen wirklich vollkommen nichtselbstleuchtend sind. Spektroskopisch wird die dunklere Komponente eines Doppelsternsystems bereits unsichtbar, wenn sie um mehr als etwa zwei Größenklassen schwächer als die hellere ist. Aber selbst die schwachen Begleiter von Sirius und Procyon sind zweifellos im eigenen Licht leuchtende Gestirne. Eine beschränkte Möglichkeit des Nachweises schwach leuchtender oder dunkler Massen in der Nähe heller bieten noch die periodischen Bedeckungen nach Art der Algol- und β Lyrae-Veränderlichen, die in solchen Doppelsternsystemen auftreten, deren Bahnebenen nur einen sehr kleinen Winkel mit der Gesichtslinie bilden. Unsicher dagegen ist vorderhand noch die Deutung der Spuren absorbierender, ausgedehnter, schwach- oder nichtleuchtender kosmischer Massen (Gas- oder Staubmassen?), die besonders in der Nähe leuchtender Nebel durch die Auslöschung der hinter ihnen stehenden Sterne sich bemerkbar zu machen scheinen.[1]) Auch bezüglich der ruhenden Kalziumlinien in den Spektren

gewisser spektroskopischer Doppelsterne vom Heliumtypus ist die Deutung nicht sicher. Man neigt gegenwärtig zu der Ansicht, daß in diesen Fällen die absorbierenden Kalziumdämpfe eine äußere Atmosphäre um die Systeme bilden, sie wären dann also nicht als selbständige kosmische Massen zu betrachten.[2]) Ähnlich liegen die Verhältnisse wahrscheinlich bei den veränderlichen Sternen vom Typus R Coronae borealis, deren Lichtwechsel auf zeitweilige Verdunkelung dieser Sterne durch absorbierende staub- oder gasförmige Massen hindeutet; hier wird der Zusammenhang mit den Sternen selbst durch die Eigentümlichkeiten der Spektren derselben wahrscheinlich gemacht.[3])

Wie man sieht, ist es letzten Endes stets das Licht, auf das allein wir bei der Erforschung des Weltalls angewiesen sind. Alle bisherigen Forschungsmethoden bedienen sich daher der von den Gestirnen zu uns gelangenden Lichtstrahlen, um über die räumliche Anordnung, die Bewegungen und die physikalische Beschaffenheit derselben Aufschluß zu erhalten. Da dieser Abschnitt nur von der Physik der Fixsterne handeln soll, so werden hinsichtlich der räumlichen Anordnung und der Bewegungen nur diejenigen Erscheinungen betrachtet werden, die mit der physikalischen Beschaffenheit in erkennbarer Beziehung stehen. Hierhin gehören die Rotationsbewegungen, die periodischen Bahnbewegungen in Doppelsternsystemen, die Strömungen in den Sternatmosphären u. dgl. Die räumliche Anordnung und die allgemeinen Bewegungen der Sterne innerhalb des Gesamtsystems erfahren im nächsten Abschnitt eine besondere Darstellung.

Photometrie.

II. Forschungsmethoden. a) Untersuchung des unzerlegten Lichtes. Die Untersuchung des Fixsternlichtes geschieht auf mannigfaltige Art. Für viele Aufgaben der Photometrie und Kolorimetrie genügt bereits die visuelle Beobachtung — mit oder ohne Meßvorrichtung — des unzerlegten Lichtes. Dies ist die primitivste und älteste Weise, Sternphysik zu betreiben. Später hat man das Auge durch die photographische Platte, die Thermosäule, das Bolometer, die Selenzelle, die lichtelektrische Zelle ersetzt und damit eine größere Objektivität der Beobachtungen erzielt. Der wichtigste Fortschritt war aber zweifellos die Ausdehnung der Untersuchungen auf das spektral zerlegte Licht der Sterne, wobei sämtliche vorgenannten Beobachtungsmittel Anwendung finden können.

Aufgaben der Photometrie.

Die Untersuchungen des unzerlegten Lichtes der Sterne sind nahezu ausschließlich photometrischer Natur. Die Aufgaben der Photometrie des unzerlegten Fixsternlichtes bestehen in der Ermittelung der scheinbaren und wahren Helligkeitsverhältnisse der Gestirne, ferner in der Feststellung von Helligkeitsänderungen und deren Gesetzen und Ursachen, endlich in der Erforschung der Helligkeitsverteilung auf den Oberflächen der Sterne. Bei den flächenhaften Gebilden, den Nebelflecken, ist zu unterscheiden zwischen Gesamthelligkeit und Flächenhelligkeit. Eine nicht unwichtige Aufgabe ist noch die Ermittelung der Flächenhelligkeit des Sternhimmels und

ihrer Verteilung, insbesondere ihrer Abhängigkeit von den galaktischen Koordinaten, also von der Lage in bezug auf die Milchstraße, da sie Schlüsse auf die räumliche Anordnung des Fixsternsystems zu ziehen gestattet. Die große Bedeutung der Kenntnis der scheinbaren und wahren (absoluten) Helligkeiten möglichst vieler Fixsterne für die Erforschung des Gesamtsystems ist besonders aus den Darlegungen des nächsten Abschnittes ersichtlich.

Größenschätzung nach einer Gedächtnisskala. Begriff der Größenklasse.

Die älteste Methode, die scheinbaren Helligkeitsverhältnisse der Fixsterne zu bestimmen, ist die bereits im Almagest des Ptolemäus angewandte Methode der unmittelbaren Größenschätzungen nach einer Gedächtnisskala, die heute nur noch in solchen Fällen gebraucht wird, in denen die Helligkeit nicht das Hauptziel der Beobachtung bildet, z. B. bei den Ortsbestimmungen am Meridiankreis. Sie muß aber hier erwähnt werden, weil sie der Ausgangspunkt für die der Astronomie eigentümliche Bezeichnungsweise der Helligkeiten geworden ist. Die Entstehung dieser logarithmischen Größenklassen ist psychophysisch zu erklären; sie ist aber auch in Anbetracht der ungeheuren Helligkeitsunterschiede der Gestirne aus praktischen Gründen als eine überaus glückliche Eingebung zu bezeichnen. Im Almagest sind die dem unbewaffneten Auge sichtbaren Sterne in sechs Klassen oder „Größen" eingeteilt. Die hellsten Sterne werden 1. Größe, die schwächsten 6. Größe genannt. Diesem System schließen sich fast sämtliche späteren Helligkeitsangaben an. Als man im vergangenen Jahrhundert dazu überging, die Helligkeitsverhältnisse der Sterne durch wirkliche Messungen festzulegen, fand man, daß die — inzwischen auf die teleskopischen Sterne ausgedehnten — Größenklassen im großen und ganzen nicht einer konstanten Helligkeitsdifferenz, sondern einem konstanten Helligkeitsverhältnis entsprachen, ein Umstand, der bekanntlich in dem Fechnerschen psychophysischen Gesetz begründet ist. Es ist also der Quotient der Helligkeiten, die zwei aufeinanderfolgenden Größenklassen entsprechen, nahezu eine Konstante. Nach dem Vorschlage Pogsons[4]) hat man für diese Konstante den Wert 2.512 angenommen, der einerseits dem tatsächlichen Wert ziemlich nahekam, andererseits den Vorteil hat, daß sein Logarithmus gleich der runden Zahl 0.400 ist. Sind also J_1 und J_2 die gemessenen Helligkeiten zweier Sterne, so ist die Differenz ihrer Größenklassen m_1 und m_2 bestimmt durch die Beziehung: $\frac{J_1}{J_2} = (2.512)^{m_2 - m_1}$ oder $\log J_1 - \log J_2 = 0.4\,(m_2 - m_1)$. Der Nullpunkt der Größenskala ist natürlich beliebig; man hat ihn unter möglichst engem Anschluß an die älteren Helligkeitssysteme so bestimmt, daß jetzt einem mittleren Stern der früheren 1. Größenklasse, die unterschiedslos Sterne so verschiedener Helligkeit wie Sirius, Wega, Altair und Deneb enthielt, die Größe 1.0^m zukommt. Dann erhalten die helleren Sterne der alten 1. Größenklasse Größen, die zwischen 0.0^m und 1.0^m liegen, während für die beiden hellsten Fixsterne, Sirius und Canopus, sogar negative Größen (-1.6^m bzw. -0.9^m) eingeführt werden mußten.

Methode der Stufenschätzung.

Einen Fortschritt auf dem Wege von der unmittelbaren Größenschätzung zur wirklichen Helligkeitsmessung bedeutete die Argelandersche Stufenschätzungsmethode und ihre Abarten[5]), die als eine Fortbildung des ähnlichen Verfahrens von W. Herschel[6]) anzusehen sind. Die Argelandersche Methode besteht im wesentlichen darin, daß an Stelle der absoluten Schätzungen Vergleichungen von wenig verschieden hellen Sternen untereinander treten. Die geschätzten Helligkeitsunterschiede werden durch Zahlen ausgedrückt, die Stufen genannt werden. Es bedeutet z. B. *a* 2 *b*, daß der Stern *a* um zwei Stufen heller als der Stern *b* ist. Erfahrungsgemäß entspricht der Wert einer Stufe im Durchschnitt einer großen Zahl von Beobachtern ungefähr 0.1^m. Die Methode findet auch heute noch ausgedehnte Anwendung auf dem Gebiete der veränderlichen Sterne.

Meßvorrichtungen.

Von den zahlreichen eigentlichen Meßvorrichtungen, die im Laufe des vergangenen Jahrhunderts in der Astrophotometrie zur Anwendung gekommen sind, seien nur die praktisch wichtigsten angeführt. Von Vorrichtungen für visuelle Messungen sind zu nennen: die auf der Polarisation des Lichtes beruhenden Sternphotometer von Zöllner und Pickering; die Photometer mit Absorptionskeil — Konstruktionen von Kayser, Müller, Pickering[7]), Rosenberg, Graff; das Flächenphotometer von Hartmann.

Zöllners Photometer.

Das Zöllnersche Sternphotometer, dessen heutige vollendete Form von Müller herrührt[8]), besteht im wesentlichen aus einem festen und einem drehbaren, mit Teilkreis verbundenen Nicol, durch die das Licht eines künstlichen, im Gesichtsfeld des Fernrohrs sichtbaren Sternes meßbar verändert und gleichhell mit dem natürlichen Stern gemacht werden kann. Die Helligkeit des künstlichen Sternes ist proportional dem Quadrat des Sinus des am Teilkreis abgelesenen Winkels, vorausgesetzt daß der Indexfehler des Kreises Null ist, d. h. daß bei der Einstellung 0^0 kein Licht durch das zweite Nicolprisma hindurchgeht. Ein drittes drehbares, ebenfalls mit einem Teilkreis versehenes Nicol und eine senkrecht zur Kristallachse geschliffene Bergkristallplatte von bestimmter Dicke dienen dazu, dem künstlichen Stern eine passende Färbung zu erteilen, und können auch zu Farbenmessungen benutzt werden, was indessen niemals in größerem Umfange geschehen ist. Zur weiteren Anpassung der Färbung des künstlichen Sternes an die natürlichen Sternfarben benutzt man noch blaue Gläser, die in den Strahlengang des künstlichen Sternes eingeschaltet werden. Als künstliche Lichtquelle dient in neuerer Zeit eine kleine elektrische Glühbirne, die eine kleine Diaphragmenöffnung oder eine kleine Stahlkugel beleuchtet. Die Konstanz ihrer Helligkeit für die Zeitdauer einer Vergleichung zweier Sterne miteinander ist durch die Speisung mit Akkumulatorenstrom und durch die Kontrolle mit einem Amperemeter gewährleistet. Der künstliche Stern dient nur als Verbindungsglied zwischen den miteinander zu vergleichenden natürlichen Sternen. Vergleichungen mit irdischen Lichtquellen kommen für die Astrophotometrie in der Regel nicht in Betracht, sie sind wegen der beständigen unkontrollierbaren Veränderungen der Durchsichtigkeit der Atmo-

sphäre nur von geringem wissenschaftlichen Wert. Mit dem Zöllnerschen Photometer ist im allgemeinen eine Genauigkeit von 5 % zu erzielen, die unter gewissen Bedingungen noch auf etwa 3 % erhöht werden kann.

Pickerings Photometer

Die Pickeringschen Photometer[9]) unterscheiden sich im wesentlichen dadurch von dem Zöllnerschen Typus, daß entweder statt des künstlichen Sternes ein natürlicher, polnaher Stern als Verbindungsglied benutzt wird (Meridianphotometer), oder daß eine unmittelbare Vergleichung zweier benachbarter Sterne stattfindet. Als Polarisator dient in den Pickeringschen Formen ein Rochon oder ein achromatisiertes doppelbrechendes Kalkspatprisma, als Analysator ein mit Teilkreis verbundenes Nicol. Verglichen wird das ordentliche Bild der einen Lichtquelle mit dem außerordentlichen der anderen; das Helligkeitsverhältnis ist daher bei richtiger Justierung des Apparates gleich dem Quadrat der Tangente derjenigen Kreisablesung, bei der die beiden Bilder gleich hell sind. Das Meridianphotometer, mit dem die Sterne nur in der Nähe des Meridiandurchganges gemessen werden können, dient nur Katalogisierungszwecken. Es besteht aus zwei horizontal und senkrecht zur Meridianebene montierten Fernrohren gleicher Öffnung, vor deren Objektiven sich je ein unter 45^0 gegen die optische Achse geneigter und um diese drehbarer Spiegel befindet. Das südliche Fernrohr, das eine etwas längere Brennweite hat, ragt mit dem Objektivende über das nördliche so weit hinaus, daß man mit seinem Spiegel den ganzen Meridian überstreichen kann. Mit dem nördlichen Fernrohr wird ein polnaher Stern eingestellt, der als Vergleichstern bei den Helligkeitsmessungen dient. Im gemeinsamen Okularende befindet sich nahe der Brennebene ein Rochonprisma und zwischen Okular und Auge ein Nicol, verbunden mit Teilkreis. Die Winkel des Kalkspatprismas sind so gewählt, daß das ordentliche Bild des Meridiansternes mit dem außerordentlichen Bilde des Polarsternes nahe zusammenfällt. Der Polstern dient, wie beim Zöllnerschen Photometer der künstliche Stern, nur als Verbindungsglied. Die zweite Form des Pickeringschen Photometers gestattet die unmittelbare Vergleichung nahe beieinander stehender Sterne. Von allen visuellen Sternphotometern ist sie wohl der größten Genauigkeit fähig; man kann sie auf etwa 3 % schätzen. Je nach der Größe des scheinbaren Abstandes der beiden zu vergleichenden Sterne werden zwei verschiedene Anordnungen benutzt. Für weitere Distanzen (3′—40′ bei Verbindung des Photometers mit einem Fernrohr von 6.8 m Brennweite) ist ein Rochonsches Prisma in der Nähe der Brennebene des Fernrohres befestigt. Längs der optischen Achse des Fernrohres lassen sich zwischen Fokus und Objektiv zwei mit ihrer Basis aneinandergelegte achromatische Prismen von kleinem Brechungswinkel bewegen, durch die die beiden Sternbilder, das außerordentliche Bild des einen und das ordentliche des anderen, einander nahegebracht werden können. Für ganz kleine Distanzen dient eine Form ohne achromatische Prismen, bei der das Rochonsche Prisma selbst längs der optischen Achse verschoben wird. Eine dritte Form, die sich weniger gut bewährt hat, war speziell zur Vergleichung von Satelliten mit ihrem Planeten bestimmt.

Keilphotometer. Die moderne Form des Keilphotometers hat zuerst Kayser[10]) in Danzig (1862) angegeben, ohne jedoch praktische Versuche mit demselben zu veröffentlichen. Ausgedehnte Anwendung fand es in einer unvollkommenen Anordnung zuerst durch Pritchard 1881 in der Uranometria Oxoniensis. Von vollendeter Form ist das von Müller angegebene Potsdamer Modell[11]). Die eigentliche Meßvorrichtung besteht aus einem achromatischen neutral gefärbten Glaskeil in der Brennebene des Fernrohres, durch dessen Verschiebung ein Stern im Gesichtsfeld des Fernrohres bis zur Unsichtbarkeit abgeschwächt wird. Die dazu nötige Verschiebung des Keiles ist an einer Millimeterskala ablesbar. Die einer Verschiebung um 1 mm entsprechende Helligkeitsänderung, die Keilkonstante, muß empirisch bestimmt werden. Da der Moment des Auslöschens einer Lichtquelle nur ungenau zu beobachten ist und mannigfachen Fehlerquellen unterliegt, so ist später von mehreren Seiten unabhängig (Müller, Pickering, Hartmann, Rosenberg, Graff)[12]) die naheliegende Verbesserung eingeführt worden, daß statt des Momentes des Auslöschens der Moment der Gleichheit des natürlichen Sternes mit einem zugleich im Gesichtsfeld befindlichen künstlichen Stern beobachtet wird. Verändert wird entweder die Helligkeit des natürlichen (Müller, Rosenberg) oder des künstlichen Sternes (Pickering, Hartmann, Graff). Beide Methoden haben ihre Vorteile und Nachteile.

Flächenphotometer. Ein Flächenphotometer für astrophotometrische Aufgaben, das offenbar großer Genauigkeit fähig ist, hat Hartmann 1899 angegeben.[13]) Das Prinzip dieses Instrumentes ist das gleiche wie das seines Mikrophotometers, das weiter unten beschrieben werden wird. Ein auf demselben Prinzip beruhendes Flächenphotometer hat auch Schoenberg 1914 konstruiert.[14]) Das Flächenphotometer eignet sich in erster Linie zur Photometrie der Planetenoberflächen u. dgl., ist aber von Schoenberg auch auf extrafokale Sternscheibchen angewandt worden.

Photographische Photometrie. Die photographische Photometrie ist in den letzten Jahrzehnten außerordentlich vervollkommnet worden. Durch größere Reichweite, höhere erreichbare Genauigkeit, größere Objektivität, die Möglichkeit, Sterne beliebig verschiedener Färbung streng miteinander vergleichen zu können, endlich durch größere Freiheit von systematischen Einflüssen bietet sie erhebliche Vorteile vor der visuellen Photometrie. Unter Anwendung gewöhnlicher photographischer Platten und für den photographischen Spektralbereich achromatisierter Objektive erhält man photographische Helligkeitsverhältnisse, die in bestimmter, vom Spektraltypus (oder der Farbe) der Sterne abhängender Weise von den visuell ermittelten Helligkeitsverhältnissen verschieden sind. Es ist ja das Auge sowohl wie die photographische Platte nur für einen begrenzten, für beide verschiedenen, Spektralbereich empfindlich, und die Energie-

Farbenindex. verteilung in den Sternspektren ist mit dem Spektraltypus verschieden. Setzt man willkürlich fest, daß photographische und visuelle Helligkeit eines Sternes vom I. Spektraltypus (A0) einander gleich sein sollen, so ist die in Größenklassen ausgedrückte Differenz „photographische minus visuelle Helligkeit“

bis zu einem gewissen Grade ein Maß für den Spektraltypus oder die Farbe. Diese Differenz wird „Farbenindex" genannt. Sie ist negativ für die Spektralklassen, die in der Spektralreihe dem I. Typus (A) vorangehen (O und B), positiv und mit dem Fortschreiten in der Spektralreihe im allgemeinen anwachsend für die auf I folgenden Klassen II, III, IV und VI (F, G, K, M, N, R). Die in Klammern gesetzte Cannonsche Bezeichnung der Spektraltypen wird später erklärt werden. Unter der obigen willkürlichen Festsetzung ist also die photographische Helligkeit der Sterne der Spektralklassen O und B größer als ihre visuelle, für die Klassen F bis R kleiner.[15]) Ordnet man die für eine große Zahl von Sternen gefundenen Farbenindices nach dem Spektraltypus, so ergibt sich eine ziemlich enge Beziehung zwischen diesen beiden Eigenschaften der Sterne, die noch genauer erfüllt wird, wenn als eine dritte charakteristische Eigenschaft die wahren (absoluten) Helligkeitsverhältnisse der Sterne eingeführt werden, was nachher noch näher betrachtet werden soll. Der funktionale Zusammenhang zwischen Farbenindex, Spektrum und Farbe kann, vorausgesetzt, daß die notwendigen empirischen Daten vorliegen, genähert mittels der Planckschen Strahlungsformel erhalten werden.

Absolute Größenskala und absolute Helligkeit.

Das Wort „absolut" wird in der Astrophotometrie mit verschiedener Bedeutung angewandt. Unter einer absoluten Größenskala versteht man eine solche, in der streng der Definition gemäß das einem Unterschied von einer Größenklasse entsprechende Helligkeitsverhältnis 1 : 2.512 beträgt. Unter absoluter Helligkeit oder Größe der Sterne versteht man die auf eine bestimmte Entfernungseinheit — jetzt gewöhnlich die einer Parallaxe von 0.1″ entsprechende Entfernung, die rund 32 Lichtjahre beträgt — reduzierte scheinbare Helligkeit oder Größe der Sterne. Zum Vergleich dient die auf dieselbe Entfernung reduzierte visuelle Sterngröße einer fingierten Sonne, die zu 5.00^m angenommen wird. Dies entspricht einer Größe von -26.57^m in der Entfernung Erde-Sonne gegenüber dem gegenwärtig wahrscheinlichsten Wert von -27.0^m für unsere wirkliche Sonne. Auf die Parallaxe 1″ bezogen beträgt die Größe der fingierten Sonne 0.00^m. Bei Angaben der Helligkeit selbst (luminosity) wird die Helligkeit der letzteren als Einheit genommen.

Schwierigkeit der Bestimmung absoluter Größen

Die Einordnung der Sterne in eine streng absolute Größenskala gehört zu den schwierigsten Aufgaben der praktischen Astrophotometrie. Ihre Schwierigkeit erhellt aus folgender kurzer Betrachtung. Nimmt man an, daß in einer gegebenen Größenskala dem Helligkeitsverhältnis 1 : 2.512 ein Größenklassenunterschied 1.01^m statt 1.00^m entspricht, daß also ein systematischer Fehler von 1 % vorhanden sei, so würde dadurch das Helligkeitsverhältnis eines Sternes 16. Größe und eines Sternes 1. Größe um 14.8 %, und das Helligkeitsverhältnis eines Sternes 1. Größe und der Sonne um 29.4 % verfälscht werden. In Wirklichkeit zeigen aber z. B. die Helligkeitsskalen der Potsdamer photometrischen Durchmusterung und der „Revised Harvard Photometry" einen Unterschied von $2\frac{1}{2}$ %, obwohl beide auf dem als streng gel-

tenden Malusschen Cosinusquadratgesetz beruhen. Es sind wahrscheinlich in erster Linie subjektive Einflüsse auf die Messungen, die hier in Betracht kommen. Noch größer wird die Schwierigkeit, eine absolute Skala der Sternhelligkeiten zu schaffen, in der photographischen Photometrie. Die Anlehnung an eines der visuellen Helligkeitssysteme setzt die Kenntnis der individuellen Farbenindices der Sterne voraus, die aber ihrerseits bereits das Vorhandensein absoluter Skalen zur Vorbedingung haben. Nichtsdestoweniger scheinen diese erheblichen technischen Schwierigkeiten gegenwärtig im wesentlichen überwunden zu sein.

Photovisuelle Größen.

Helligkeitsmessungen, die den visuellen sehr nahe äquivalent sind, hat man in neuerer Zeit auch auf photographischem Wege erzielt durch Anwendung orthochromatischer Platten und geeigneter Gelbfilter. Dies ist z. B. in umfangreichem Maße durch Parkhurst in der Yerkes Actinometry geschehen. Solche „photovisuelle" Helligkeitsbestimmungen können auch mit Objektiven erhalten werden, die nur für das visuelle Spektrum achromatisiert sind. Reflektoren können selbstverständlich ohne weiteres für alle Spektralbereiche benutzt werden, haben aber gegenüber den Refraktoren den Nachteil starker Abhängigkeit der gemessenen Helligkeiten vom Abstande von der optischen Achse.

Photographische Photometrie: Durchmessermethode.

Sieht man von der auch auf die photographischen Sternbildchen anwendbaren Argelanderschen Stufenschätzungsmethode ab, so sind es zwei Methoden, nach denen aus den photographischen Aufnahmen von Sternen deren Helligkeitsverhältnisse ermittelt werden, die Durchmessermethode[16]) und die Schwärzungsmethode.[17]) Macht man von einem Stern auf derselben Platte nebeneinander Aufnahmen mit verschiedener Belichtungszeit, so findet man, daß die photographischen Bilder des Sternes nicht nur durch den Grad der Schwärzung, sondern auch durch ihren Durchmesser sich unterscheiden. Der Durchmesser wächst mit der Belichtungszeit. Bei gleicher Belichtungsdauer und verschieden hellen Sternen wächst er mit der Helligkeit der Sterne. Die Ursache dieser Erscheinung ist in der Unruhe der Luft, mangelhafter Strahlenvereinigung durch das Objektiv, Reflexion in der photographischen Schicht usw. zu suchen; nach Rosenberg[18]) kommt auch die Erhellung des Himmelsgrundes in der unmittelbaren Nähe der Sterne in Betracht. Die Abhängigkeit des Durchmessers des photographischen Sternbildchens von der eingestrahlten photographischen Energie hat man als Maß für die photographische Helligkeit benutzt, und man hat Interpolationsformeln für die Beziehung zwischen Helligkeit und Durchmesser aufgestellt. Wie zu erwarten war, ergeben sich von Fall zu Fall, d. h. für verschiedene Beobachtungsbedingungen, verschiedene Formeln. Die Methode setzt natürlich ein bereits vorhandenes photographisches Helligkeitssystem voraus, an das der Anschluß bewirkt werden kann. Als Beispiele mögen zwei beliebige solcher Interpolationsformeln angeführt werden, die Charliersche[19]) $m = a - b \log D$, und die Parkhurstsche[20]), $m = a - b\sqrt{D}$. D bedeutet den Durchmesser des photographischen Sternbildchens, m die Helligkeit in Größenklassen, b eine vom

Instrument und der Plattensorte abhängende Konstante, a eine von der Empfindlichkeit der Platte, der Durchsichtigkeit der Luft und der Länge der Belichtungszeit abhängende Größe. Charlier fand D proportional der 4. Wurzel der Belichtungszeit sich ändernd; Scheiner und Wolf[21]) fanden, daß D mit wachsender Belichtung immer langsamer zunimmt.

Schwärzungsmethode.

Die Schwärzungsmethode benutzt den Grad der Schwärzung extrafokaler Sternbildchen als Maß für die relative Helligkeit. Sie ist zuerst von Schwarzschild[22]) theoretisch behandelt, praktisch angewandt und zu einem hohen Grade von Vollkommenheit entwickelt worden. Nennt man $i_1, i_2, i_3, \cdots$ die Lichtstärke einer Reihe von Sternen, $t_1, t_2, t_3 \cdots$ die bei den einzelnen Sternen angewandten Belichtungszeiten, so würde man von vornherein erwarten, daß man unter sonst gleichen Bedingungen gleiche Schwärzungen der extrafokalen Sternscheibchen erhält, wenn $i_1 t_1 = i_2 t_2 = i_3 t_3 = \cdots =$ Konst. Die Schwärzung S würde also eine Funktion von it sein, $S = \varphi(it)$. Dieses sogenannte Reziprozitätsgesetz ist aber nicht erfüllt, die photographische Wirkung wächst im allgemeinen langsamer als die Belichtungszeit. Gleiche Schwärzung S auf einer Platte ist angenähert vorhanden, wenn $it^p =$ Konst., wobei p im allgemeinen kleiner als 1 ist. Die Beziehung zwischen der Schwärzung S einerseits und der Belichtungszeit t und der Intensität i andererseits nennt man das Schwärzungsgesetz. Die Inkonstanz des Exponenten p[23]), der von dem absoluten Betrag der Schwärzung, genauer von der Intensität i der Belichtung, abhängt, ferner der Einfluß der Entwicklungsart verbieten die naheliegende Anwendung der Veränderung der Belichtungszeiten als photometrisches Prinzip. In der astrophotometrischen Praxis verfährt man in der Weise, daß man auf der Platte, die die Sternaufnahme enthält, auch eine genau definierte photographische Schwärzungsskala erzeugt, die man auf verschiedenen Wegen zu erhalten versucht hat. Man belichtet z. B. mittels einer konstanten Lichtquelle eine Reihe von Feldern mit genau gleicher Belichtungszeit aus verschiedenen genau gemessenen Entfernungen, oder man nimmt einen photographischen Keil, der genau geeicht ist, mit auf. Es können hier nicht alle Sensitometer- und andere Methoden zur Erzielung einer absoluten photographischen Skala beschrieben werden.[24]) Das Gesagte wird das Prinzip hinreichend veranschaulichen. Nur zwei Methoden mögen noch erwähnt werden. Schwarzschild bedeckt die eine Hälfte der Platte mit einem feinen Drahtnetz, das die Helligkeiten um einen bekannten Betrag abschwächt.[25]) Hertzsprung setzt ein ganz grobes Gitter vor das Objektiv und erhält so zu beiden Seiten der Zentralbilder der Sterne kurze, noch ganz sternähnliche Beugungsspektren, deren Helligkeitsunterschied gegen das Zentralbild aus den Gitterkonstanten genau zu berechnen ist.[26]) Auf diese Weise lassen sich auch große, direkt nicht mehr genau zu messsende Helligkeitsunterschiede, z. B. zwischen einem hellen Veränderlichen und einem schwachen benachbarten konstanten Stern, bequem überbrücken, indem man ein Beugungsspektrum des helleren Sternes mit dem Zentralbild des schwächeren vergleicht.

Halbgitter.

Objektivgitter.

Schraffiermethode.

Alle Aufnahmen von Fixsternen für Schwärzungsmessungen müssen extrafokal gemacht werden, um Sternscheibchen mit einer für die Messung hinreichend großen Fläche zu erhalten. Jedoch tritt dann häufig ein sehr störender Übelstand auf, der von den Zonenfehlern des Objektivs herrührt. Statt gleichmäßig geschwärzter Flächen treten solche mit ringförmigen Verdichtungen auf. Gleichmäßig geschwärzte Flächen werden in sehr vollkommener Weise durch die Schwarzschildsche Schraffiermethode[27]) erzielt, bei der die Platte während der Belichtung durch ein Triebwerk so bewegt wird, daß das nur wenig extrafokale Sternscheibchen eine kleine Fläche möglichst gleichmäßig überstreicht. Bei einer von Brendel[28]) angegebenen und von Brill[29]) praktisch erprobten Methode wird die Platte in Rotation um die optische Achse des Fernrohres versetzt und gleichzeitig der Gang des Fernrohruhrwerks gegen die tägliche Bewegung geändert. Die Aufnahmen werden stark extrafokal gemacht. Es entstehen auf der Platte von den Sternen lange Spiralen, deren Schwärzungen an vielen Punkten gemessen werden können, wodurch ganz kurze Schwankungen in der Durchsichtigkeit der Luft unschädlich gemacht werden.

Rotierende Kamera.

Mikrophotometer.

Die Messung der Schwärzungen geschieht allgemein mit dem in der photographischen Photometrie unentbehrlichen Hartmannschen Mikrophotometer.[30]) Das Prinzip dieses sehr genauen und, wie bereits erwähnt, auch zu direkten Messungen am Himmel verwendbaren Apparates ist folgendes. Mittels des kleinen Spiegels eines Lummer-Brodhunschen Prismas wird in dem Gesichtsfeld eines Mikroskops mit zwei Objektiven, deren optische Achsen senkrecht aufeinander stehen, und von denen das eine für die photographische Aufnahme, das andere für den photographischen Meßkeil bestimmt ist, ein kleines Stück des Sternscheibchens, dessen Schwärzung gemessen werden soll, auf die direkt durch das Prisma hindurch gesehene Fläche des Meßkeiles projiziert, so daß man durch Verschieben des Meßkeiles Gleichheit der Schwärzungen erzielen und diese genau beurteilen kann. Hat man auf der Platte außerdem mittels eines der vorhin erwähnten Verfahren die Helligkeitsskala festgelegt, so kann man die Schwärzungen der Sternscheibchen mit denen der Skala vergleichen und die Schwärzungsunterschiede der Sternscheibchen unmittelbar in Intensitätsverhältnisse und Größenklassenunterschiede umsetzen.

Stereokomparator.

Kommt es nur darauf an, auf zwei gleichartigen Aufnahmen derselben Himmelsgegend diejenigen Sterne ohne größeren Zeitaufwand ausfindig zu machen, deren Helligkeit sich in der Zwischenzeit zwischen den beiden Aufnahmen merklich geändert hat, so bedient man sich des Pulfrichschen Stereokomparators[31]), einer auf dem Prinzip des Stereoskops beruhenden Einrichtung, in der die beiden zu vergleichenden Aufnahmen durch zwei Mikroskope betrachtet und wie beim Stereoskop scheinbar zur Deckung gebracht werden. Seine hervorragende Brauchbarkeit für astronomische Zwecke ist besonders von Wolf erwiesen worden. Objekte, die auf den beiden Aufnahmen nicht dieselbe Helligkeit (oder nicht dieselbe relative Lage) haben,

springen bei der Betrachtung aus der allgemeinen Ebene der übrigen Objekte deutlich heraus und werden so leicht erkannt. Mit einem „Blinkmikroskop“[32]) versehen, dient der Apparat denselben Zwecken, jedoch wird das stereoskopische Prinzip dabei verlassen. Beim Blinkmikroskop ist nur ein Okular vorhanden, in dessen Gesichtsfeld die Bilder der beiden zu vergleichenden Aufnahmen zur Deckung gebracht werden. Wird nun in einer passenden Periode abwechselnd das eine oder das andere Mikroskopobjektiv bedeckt, so ändern alle Objekte, die auf den beiden Platten verschieden sind, periodisch ihr Aussehen und ziehen so die Aufmerksamkeit des Beobachters auf sich.

Selenphotometer.

Von sehr hoher Genauigkeit sind die in den letzten Jahren in der Astrophotometrie zur Anwendung gekommenen lichtelektrischen Methoden, die selenphotometrische und die eigentliche lichtelektrische, die auf der Anwendung des Photoeffektes der Alkalizellen beruht. Die erstere, von Minschin[33]) 1895 empfohlen, dann von Stebbins[34]) seit 1907 mit ausgesprochenem Erfolge angewandt, bedient sich der Widerstandsänderungen des kristallinischen Selens bei Belichtung. Selenwiderstände, die zu Helligkeitsmessungen bestimmt sind, werden Selenzellen genannt. Der Widerstand verringert sich durch die Belichtung, ist aber außerdem von der Temperatur abhängig, so daß solche Zellen durch eine Eispackung auf konstanter Temperatur gehalten werden müssen. Ein Selenphotometer in der von Stebbins benutzten Anordnung bestand aus der Zelle am Okularende eines Refraktors, die einen Arm einer Wheatstoneschen Brücke bildete, während zwei der drei anderen Arme der Brücke konstante Widerstände hatten und der Widerstand des vierten Armes variierbar war, um das Gleichgewicht zwischen den Stromzweigen herzustellen. Den durch die Brücke geschickten Strom lieferten zwei Trockenelemente mit einer Spannung von zusammen 2.8 Volt. Der Ausschlag des Galvanometers in der Brücke wurde durch Variierung des veränderlichen Widerstandes auf Null gebracht und dann die Zelle belichtet. Der darauf erfolgende Ausschlag des Galvanometers war der Intensität der Belichtung proportional. Wegen der bekannten Ermüdungserscheinungen des Selen mußte die jeweilige Dauer einer Belichtung auf 10^s beschränkt und zwischen die einzelnen Belichtungen eine Pause von einer Minute gelegt werden. Die Empfindlichkeit des Selens ist ebenso wie die des Auges und der photographischen Platte selektiv und ihr Verlauf mit der Wellenlänge von Zelle zu Zelle etwas verschieden. Das Maximum der Empfindlichkeit liegt bei etwa 7000 AE. Mit diesem Photometer ließ sich eine Genauigkeit von etwa 1% erreichen. Seine Reichweite war jedoch gering. Mit einem Refraktor von 30 cm Öffnung waren Sterne nur bis zur 3. Größe gut meßbar.

Lichtelektrisches Photometer.

Inzwischen (1912) war die auf dem Photoeffekt der Alkalimetalle beruhende lichtelektrische Meßmethode von Elster und Geitel[35]) zu so hoher Vollkommenheit gebracht worden, daß ihre Anwendung auf astrophotometrische Aufgaben aussichtsreich erschien. Lichtelektrische Photometer mit Alkalizellen für Sternmessungen sind seit 1913 von Rosenberg in Tü-

bingen, Stebbins in Urbana und Guthnick in Babelsberg in Betrieb gesetzt worden. In England haben neuerdings A. F. und F. A. Lindemann ein lichtelektrisches Photometer gebaut.[36]) Das Wirkungsprinzip beruht auf der Abspaltung von Elektronen aus der Oberfläche des Alkalimetalles unter der Einwirkung auffallenden sichtbaren oder photographisch wirksamen Lichtes. Die Zahl der abgespaltenen Elektronen ist proportional der Intensität des auffallenden Lichtes. Die Form der Zellen für Sternmessungen ist die allgemein übliche. Als sehr zweckmäßig hat sich die vollständige Innenversilberung der Zellen bis auf ein kleines Fenster zum Durchlassen des Lichtes erwiesen. Der Photoeffekt wird durch die Aufladung des Fadens eines Elektrometers mit gespanntem Faden gemessen. Die der Belichtungsstärke innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit proportionale Geschwindigkeit des Fadenausschlages kann in einem Mikroskop mit Okularskala mittels der gewöhnlichen astronomischen Registriermethoden, wie sie bei Durchgangsbeobachtungen im Meridian üblich sind, bestimmt werden. Die Zelle wird in einer lichtdichten Kapsel eingeschlossen, die am Okularende eines Fernrohres befestigt ist. An der Kapsel hängt das Elektrometer in Cardanischer Aufhängung. Die Genauigkeit der Methode ist noch größer als die der selenphotometrischen und ihre Reichweite um etwa fünf Größenklassen ausgedehnter. Mit dem lichtelektrischen Photometer in Babelsberg, in Verbindung mit einem Refraktor von 31 cm Öffnung, sind gelegentlich noch genaue Messungen an Sternen bis zur Größe 8 oder $8^1/_2$ ausgeführt worden. Das Empfindlichkeitsmaximum liegt für kolloidales Natrium bei etwa 3400 AE, für kolloidales Kalium bei etwa 4350 AE, für kolloidales Rubidium bei etwa 4800 AE, für kolloidales Caesium bei etwa 5000 AE.[37]) Jedoch schwanken die Zahlen von Zelle zu Zelle nicht unbeträchtlich; die Lage des Maximums verschiebt sich übrigens für Na bei Bestrahlung mit Licht, das durch ein größeres astronomisches Objektiv gegangen ist, merklich nach den größeren Wellenlängen. Die obigen Zahlen gelten für gleichmäßige spektrale Energie des auffallenden Lichtes.

Radiomikrometrische und thermoelektrische Methoden.

Von sonstigen physikalischen Methoden kommen für Sternmessungen noch die radiomikrometrische (Nichol)[38]) und die thermoelektrische (Huggins, Stone, Pfund, Coblentz)[39]) in Betracht. Diese Methoden haben vor den bisher betrachteten den großen Vorzug, daß sie die für manche Fragen (z. B. für die Bestimmung der effektiven Temperatur des Sternes) sehr wichtige Gesamtstrahlung erfassen, jedoch ist ihre Ausbildung bisher noch nicht so weit gediehen, daß eine umfangreiche Anwendung in der Astrophotometrie in Betracht käme. Am meisten verspricht noch zur Zeit die thermoelektrische, die von Coblentz am Crossley-Reflektor der Licksternwarte (Öffnung 91 cm) in etwas größerem Umfang zu Strahlungsmessungen an Sternen verwandt worden ist. Coblentz benutzte ein von ihm konstruiertes Vakuum-Thermoelement von sehr geringer Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit. Bei eingehenderer Prüfung der mitgeteilten Messungen ergibt sich, daß die Reichweite der Methode in Verbindung mit einem Refraktor von

30 cm Öffnung nur etwa bis zu den Sternen 3. Größe sich erstreckt, wenn eine Genauigkeit verlangt wird, die der mit Alkalizellen erreichbaren gleichkommt. Es wäre sehr zu wünschen, daß diese Methode von einem in der Fixstern-Photometrie erfahrenen Beobachter eingehend geprüft würde. Coblentz hat auch ein Vakuum-Sternbolometer konstruiert, das ebenso wie die Bolometer bekannter Konstruktion auf der Widerstandsänderung eines geschwärzten Platindrahtes infolge Bestrahlung beruht. In Übereinstimmung mit früheren Versuchen von Warburg, Leithäuser und Johansen, Buchwald[40]) findet er für das Vakuum-Bolometer eine nicht wesentlich höhere Empfindlichkeit als für das Vakuum-Thermoelement, fürchtet dagegen, daß das Bolometer Störungen durch Wind und äußeren Temperaturschwankungen leichter ausgesetzt sein werde als das Thermoelement, so daß letzteres für astronomische Zwecke vorzuziehen sei. Andere Thermoelemente konstruierten u. a. Rubens, Pfund und Spence.[41]) Pfund hat mit seinem Apparat in Verbindung mit dem 30-zölligen Reflektor der Allegheny-Sternwarte auch einige Sternmessungen (Wega, Jupiter, Altair) ausgeführt. Vakuum-Bolometer.

Zur Messung der Schwärzung photographischer Sternbilder ist die Thermosäule in neuester Zeit von Stetson[42]) benutzt worden. Jedoch scheint seine Anordnung vor dem selbstregistrierenden Mikrophotometer von P. P. Koch mit Alkalizellen, das bei den spektralanalytischen Instrumenten beschrieben wird, keinen wesentlichen Vorzug zu besitzen, da die selektive Eigenschaft der Photozellen hierbei belanglos ist. Stetsons Apparat kann natürlich ebenso wie der Kochsche auch zu Messungen im Spektrum verwendet werden. Thermoelektrische Ausmessung von photograpischen Aufnahmen.

b) Untersuchung der Energieverteilung in den Sternspektren. Eine besondere Klasse von Aufgaben, die auf der Grenze zwischen Photometrie und Spektroskopie liegen, ist mit der Erforschung der Energieverteilung in den Sternspektren verknüpft. Unter der Voraussetzung, daß die Sternstrahlung näherungsweise als schwarze Strahlung angesehen werden kann, liefert die Kenntnis der Energieverteilung in einem Sternspektrum die Temperatur, die Flächenhelligkeit und die Gesamtstrahlung des Sternes, Größen, die von der weitgehendsten Bedeutung für die Erforschung des Sternsystems sind. Die primitivste Art der Untersuchung der Energieverteilung stellt die visuelle Schätzung der Sternfarben in einer absoluten Gedächtnis-Farbenskala dar, die indessen, in Verbindung mit den Ergebnissen anderer Forschungsmethoden, bereits zu beachtenswerten Aufschlüssen geführt hat. Die gebräuchlichste Farbenskala ist die von Osthoff[43]), die eine Modifikation der älteren Skala von J. Schmidt ist. In derselben werden die bei den einfachen Sternen auftretenden Farben — die nur bei den Komponenten von Doppelsternen auftretenden grünlichen und bläulichen Töne werden jetzt wohl allgemein als nicht objektiv angesehen — durch die Zahlen von 0 bis 9 ausgedrückt und mit c (color) bezeichnet: 0^c = Reinweiß, 1^c = Gelblichweiß, 2^c = Weißgelb, 3^c = Hellgelb, 4^c = Reingelb, 5^c = Dunkelgelb, 6^c = Rötlichgelb, 7^c = Orange, 8^c = Gelblichrot, 9^c = Rot. Die Skala ist Farbenschätzung. Lineare und zweidimensionale Farbenskala.

eine Abkühlungsskala, entsprechend der älteren Vorstellung von der Bedeutung der Sternfarben. Hagen[44]) nennt diese Skala eine eindimensionale oder lineare, die nur die Farbentöne, nicht auch ihre Sättigung angibt. Die Sättigung (Nuance) wird entstanden gedacht durch Mischung der Farbentöne mit den beiden Hilfsfarben Weiß und Schwarz. Zur Berücksichtigung beider Elemente stellt Hagen nach dem Vorgange Newtons eine zweidimensionale Skala auf, die kurz so beschrieben werden kann. Man denke sich um einen Punkt, der die Farbe Weiß darstellt, konzentrische Kreise beschrieben, auf deren Umfang man die Farbentöne Violett, Blau, Grün, Gelb, Orange, Rot und ihre Zwischenstufen verteilt. Dann stellt der radiale Abstand vom Mittelpunkt die Sättigung dar. Die Osthoffsche lineare Skala verläuft längs des Radius Weiß-Gelb und dann längs der Peripherie bis Rot. Die Farben werden in der zweidimensionalen Skala durch Buchstaben (B = Blau, Y = Gelb usw.) und ihre Sättigungen durch Zahlenindices (B^1 = Bläulichweiß, Y^1 = Gelblichweiß usw.) ausgedrückt. Zwischen den physikalischen Eigenschaften der Sterne: Farbenindex, Energieverteilung im Spektrum, Spektraltypus, Temperatur und scheinbare Farbe bestehen enge, wenn auch nicht vollkommen eindeutige Beziehungen. Aus diesem Grunde behalten die visuellen Farbenschätzungen wissenschaftlichen Wert, solange sie nicht allgemein durch eine quantitative Methode ersetzt werden können.

Farbenäquivalente: Farbenindex.

Von den Methoden, die mehr oder weniger auf eine Bestimmung der Energieverteilung in den Sternspektren hinauslaufen, ist die der photographisch-visuellen Bestimmung der Farbenindices bereits erörtert worden. Man kann aus solchen Farbenindices, wie es Schwarzschild in der Göttinger Aktinometrie versucht hat, mittels der Planckschen Strahlungsformel näherungsweise unmittelbar auf die Gesamtstrahlung und die Temperatur schließen, oder aber man kann die Farbenindices mit solchen von Sternen vergleichen, deren Energieverteilung man auf spektralphotometrischem Wege durch Messung ermittelt hat, wobei man voraussetzt, daß Spektraltypus, Energieverteilung und Farbenindex in eindeutiger Beziehung zueinander stehen, was, wie bereits früher erwähnt, in Strenge nicht der Fall ist, indem mindestens noch ein unabhängiger Parameter, die absolute Helligkeit, hineinspielt. Daß dieser Parameter in irgendeinem Zusammenhang mit der Dichte der Sterne oder der Konstitution ihrer Atmosphären steht, scheint immer klarer zu werden. Eindeutige Beziehungen wären nur dann zu erwarten, wenn die Sterne in Wahrheit sich wie schwarze Strahler verhielten.

Effektive Wellenlänge.

Andere Methoden, Farbenäquivalente zu erhalten, sind die folgenden. Die Bestimmung von effektiven Wellenlängen nach der Interferenzmethode ist in größerem Umfange zuerst von Hertzsprung und von Bergstrand[45]) angewandt worden. Vor das Objektiv eines photographischen Fernrohres wird ein grobes Gitter gesetzt, durch das zu beiden Seiten der Zentralbilder der Sterne kurze Beugungsspektren erzeugt werden. Der optische Schwerpunkt dieser Beugungsspektren, die „effektive Wellenlänge", hängt außer

von der benutzten Plattensorte von der Energieverteilung in den Sternspektren ab. Es werden daher die linearen Abstände der optischen Schwerpunkte der Spektren gleicher Ordnung zu beiden Seiten der Zentralbilder vom Spektraltypus oder der Farbe abhängen und diese mit denselben Einschränkungen, wie sie bei der Betrachtung der Farbenindex-Methode gemacht werden mußten, bestimmen. Es wird also die Bestimmung des Farbenäquivalents bzw. des Spektrums oder der Farbe auf eine lineare Messung auf der photographischen Platte zurückgeführt. Die Methode scheint zwar keiner großen Genauigkeit fähig zu sein, ist aber für Durchmusterungen im Großen von weittragender Bedeutung, um so mehr, als sie sich noch auf sehr schwache Sterne anwenden läßt. Die Anwendung einer Modifikation der Methode der effektiven Wellenlängen zur Bestimmung absoluter Sterngrößen ist neuerdings von Lindblad[46]) versucht worden, indem nicht nur die effektive Wellenlänge, sondern auch die Grenze der Beugungsspektren nach der Seite der kürzeren Wellen bestimmt wurde, für die unter sonst gleichen Bedingungen eine deutliche Abhängigkeit von der absoluten Helligkeit gefunden wurde. Auch lichtelektrisch lassen sich Farbenäquivalente gewinnen, entweder durch Benutzung von Zellen mit verschiedener Lage des Empfindlichkeitsmaximums (Na-Zellen und Rb- oder Cs-Zellen) oder durch Verwendung von Farbenfiltern bei einer und derselben Zelle.[47]) Diese Bestimmungen sind sehr genau, lassen sich jedoch mit einem 30 cm-Refraktor nicht unter die 7. photographische Größe ausdehnen. Sie sind praktisch völlig unabhängig von Skalenfehlern und können durch geeignete Wahl von Zelle und Filter den photographisch-visuellen Farbenindices streng vergleichbar gemacht werden. Farbenfilter zur Bestimmung von Farbenindices verwendet auch Seares[48]), indem er auf orthochromatischen Platten Sternaufnahmen mit und ohne Gelbfilter macht und die Belichtungszeiten bestimmt, die nötig sind, um gleich kräftige Bilder eines Sternes mit und ohne Filter zu erzielen.

Bestimmung der absoluten Helligkeit durch effektive Wellenlängen.

Lichtelektrische Farbenindices. Benutzung von Farbenfiltern.

Unmittelbare Messungen im spektralzerlegten Licht sind, abgesehen von einigen älteren Versuchen von H. C. Vogel und G. Müller und von E. C. Pickering erst in neuerer Zeit von Wilsing und Scheiner sowie von Wilsing und Münch auf visuellem und von Rosenberg auf photographischem Wege in größerem Umfange ausgeführt worden.[49]) Diese direkten Untersuchungen über die Energieverteilung in den Sternspektren bilden zur Zeit die Grundlage unserer Vorstellungen über die Strahlung der Fixsterne. Wilsing und Scheiner bedienten sich bei ihren visuellen Messungen des 80 cm-Refraktors der Potsdamer Sternwarte und eines Spektralphotometers vom Crovaschen Typus. Als Vergleichslicht diente das Spektrum einer Glühlampe, das an das Spektrum eines schwarzen Strahlers angeschlossen wurde. Die Meßvorrichtung bestand aus einem Nicolsystem. Die gemessene Energieverteilung in den Sternspektren liefert, wenn das Absorptionsvermögen der Sternatmosphären gewissen Bedingungen entspricht, die Wilsing a. a. O. S. 29 f. formuliert, mittels der Planckschen For-

Messung der Energieverteilung im Spektrum.

mel die „effektive" Temperatur, d. h. diejenige Temperatur, die entsprechend der Energieverteilung an der Oberfläche des Sternes herrschen würde, wenn dieselbe sich wie ein schwarzer Strahler verhielte. Diese so gemessenen effektiven Temperaturen der Sterne können niedriger oder höher als die wahren sein, jedoch werden die Unterschiede für die Sterne mittlerer und niedriger Temperatur wahrscheinlich nicht bedeutend sein. Die aus der Gesamtstrahlung erhaltenen effektiven Temperaturen nichtschwarzer Strahler sind stets kleiner als die wahren. Rosenbergs photographische Ermittelung des Energieverlaufs in den Sternspektren wurde mittels einer Uviolglas-Prismenkamera (vgl. S. 391) ausgeführt. Die Schwärzungen der photographischen Sternspektren wurden mit denen des Spektrums von α Aquilae verglichen.

Selbstregistrierendes Mikrophotometer.

Auf automatischem Wege wird der Schwärzungsverlauf in einem photographischen Spektrum mittels des selbstregistrierenden Mikrophotometers von P. P. Koch[50]) erhalten. Eine ähnliche Vorrichtung von Stetson ist bereits erwähnt worden. In dem Kochschen Apparat fällt ein dünnes Lichtbündel durch die photographische Platte, die die Aufnahme des zu untersuchenden Spektrums enthält, hindurch auf die Zelle eines lichtelektrischen Photometers. Der Photoeffekt wird mit einem Elektrometer mit gespanntem Faden gemessen, und die Bewegung des Elektrometerfadens wird auf die übliche Weise photographisch registriert. Spektralplatte und Registrierplatte werden durch ein Triebwerk bewegt. Als Widerstand zwischen Elektrometerfaden und Erde, um begrenzte Ausschläge des Fadens (statt Aufladegeschwindigkeiten) zu erhalten, dient eine zweite Photozelle, die dauernd von derselben Lichtquelle belichtet wird, die auch das Strahlenbündel für die erste Zelle liefert. Da der Widerstand der Zelle als umgekehrt proportional der Stärke der Belichtung angesehen werden kann, so werden durch diese Anordnung Schwankungen der Helligkeit der Lichtquelle eliminiert. Eine dritte, mit der zweiten verbundene Zelle dient zur Verminderung der Trägheit des Elektrometerfadens. Das belichtende Strahlenbündel kann so dünn gemacht werden, daß auch ganz feine Spektrallinien noch deutliche Zacken in der registrierten Intensitätskurve des Spektrums hervorbringen. Mit diesem Apparat kann auch die Struktur der Spektrallinien studiert werden; wahrscheinlich eignet er sich bei entsprechender exakter mechanischer Ausführung auch zu genauen Wellenlängenbestimmungen, besonders in Fällen sehr breiter und verwaschener Linien, in denen das Meßmikroskop versagt. Ein für diesen speziellen Zweck nach den Angaben Freundlichs von Toepfer gebautes Photometer ist seit kurzem auf der Potsdamer Sternwarte in Betrieb gesetzt.

c) Spektroskopische Methoden. Von den verschiedenen Mitteln zur Erzeugung von Spektren kommt für die Analyse des schwachen Fixsternlichtes fast nur das Prisma in Betracht. Nur vereinzelt, bei den hellsten Sternen und bei den nahezu monochromatischen Gasnebeln, sind Reflexionsgitter bzw. andere Interferenzmethoden benutzt worden, wenn sehr große Dispersion

erforderlich war.[51]) Sternspektroskope für visuelle Beobachtungen werden jetzt nur noch in kleinen Dimensionen (meist als Okularspektroskope mit gerader Durchsicht) und hauptsächlich für schnelle vorläufige Information benutzt. Für den regelmäßigen Gebrauch dienen die Prismenkamera (Objektivprisma) und der Spaltspektrograph, erstere für qualitative Durchmusterungsarbeit, letzterer für genaue Messungen. Die visuelle Beobachtung ist fast vollständig durch die weit überlegene Photographie verdrängt. Stern-spektroskop.

Die Prismenkamera besteht aus einem photographischen Fernrohr und einem Prisma oder einem Satz von mehreren Prismen, die vor das Objektiv gesetzt werden. In der Fokalebene des Fernrohres bilden sich dann die Spektren sämtlicher Sterne, die gerade im Gesichtsfelde sich befinden, ab. Dieses Instrument eignet sich hervorragend zu spektralen Durchmusterungsarbeiten auf breiter Grundlage. Die große, jetzt bereits einige Hunderttausend Sterne umfassende spektroskopische Durchmusterung der Harvard-Sternwarte[52]), die der Initiative Pickerings und der Ausdauer seiner Mitarbeiterinnen ihre Entstehung verdankt, und auf der die jetzt allgemein gebräuchliche Harvard-Klassifikation der Sternspektren beruht, ist ausschließlich mit einer solchen Einrichtung ausgeführt worden. Das größte der benutzten Instrumente hat 27.5 cm Öffnung, 3.8 m Brennweite und vier Objektivprismen von 27.5 cm Kantenlänge und 15^0 brechenden Winkel, die einzeln, zu zweien, zu dreien oder alle vier zusammen benutzt werden können. Die Länge der mit allen vier Prismen erzielten photographischen Spektren, gerechnet von H_β bis H_ε, ist 8.0 cm. Ein anderes Instrument hat 33 cm Öffnung, 1.9 m Brennweite und 1 bis 3 Prismen. Die größte Länge der Spektren beträgt 7.4 cm. In den letzten Jahren wurden auch Objektivprismen für einen 24-zölligen und einen 16-zölligen Refraktor angeschafft. Um den Spektren die zur Erkennung der Linien nötige Breite zu geben, wird die brechende Kante der Prismen parallel der täglichen Bewegung gestellt und der Gang des Fernrohruhrwerks etwas verändert, so daß die Sterne während der Dauer der Aufnahmen auf der Platte eine kleine Strecke durchlaufen. Die Qualität der so erzielten Spektren wird durch die Angaben beleuchtet, daß mit dem 27.5 cm-Refraktor und vier Prismen bis zu 500 Linien sichtbar gemacht werden konnten, und daß in den Spektren vom I. Typus die äußerst feinen Metallinien in einer Anzahl bis zu 200 zu erkennen sind. Die Ausmessung der Spektren zur genäherten Bestimmung der Wellenlängen erfolgt mit einem Meßmikroskop mit zwei zueinander senkrechten Bewegungen. Ein mit derselben Prismenkamera aufgenommenes Sonnenspektrum dient zum Vergleich. Die Klassifizierung der Spektren wird durch Vergleichung mit den Spektren ausgewählter Normalsterne ausgeführt. Prismenkameras von zumeist kleineren Dimensionen werden an einer ganzen Reihe von Sternwarten benutzt. Zur Beurteilung der Reichweite möge die Angabe dienen, daß mit einer der Potsdamer Sternwarte gehörenden Prismenkamera von 15 cm Öffnung von Zeiß bei zweistündiger Belichtung noch gute Spektren von Sternen 9. Größe zu erzielen sind. Originell ist die von Eberhard und Hertzsprung[53]) ange- Objektivprisma. Spektroskopische Sterndurchmusterungen.

Kombination von Objektivprisma und Objektivgitter.

wandte Kombination von Objektivprisma und Objektivgitter für spektralphotometrische Zwecke. Prisma und Gitter wurden so vor das Objektiv gesetzt, daß ihre Dispersionen senkrecht zueinander wirkten. Die Helligkeitsunterschiede der verschiedenen Bilder sind aus den Gitterkonstanten zu berechnen und geben die Skala für die Helligkeitsmessungen in den Spektren ab.

Radialgeschwindigkeitsbestimmungen mit dem Objektivprisma.

Versuche, das Objektivprisma auch zur Bestimmung von Radialgeschwindigkeiten zu benutzen, sind hauptsächlich von Pickering und von Schwarzschild[54]) gemacht worden, haben jedoch noch nicht zu einem befriedigenden Ergebnis geführt. Der Wert der Methode würde darin bestehen, daß eine einzige Aufnahme die Radialgeschwindigkeiten aller gleichzeitig im Gesichtsfeld der Kamera befindlichen Sterne hinreichender Helligkeit liefern würde, während mit dem Spaltspektrograph jeder Stern einzeln aufgenommen werden muß; auch ist der Spaltspektrograph der Prismenkamera an Lichtstärke bedeutend unterlegen. Pickering schlägt einerseits die Benutzung geeigneter selektiver Filter, die scharfe Absorptionslinien geben, andererseits zwei Aufnahmen mit um 180° verschiedenen Stellungen des Objektivprismas vor. Als Filter der geforderten Art kommt Neodymchlorid, das in Lösung von bestimmter Konzentration und Schichtdicke bei λ 4272 eine scharfe Absorptionslinie erzeugt, in Betracht. R. W. Wood hat noch Versuche mit anderen Filtern, darunter auch Dämpfen, gemacht und meint, daß an geeigneten Filtern zur Erzeugung scharfer Absorptionslinien kein Mangel sein würde. Der leitende Gedankengang bei dieser Methode ist folgender: Setzt man das Filter in den Strahlengang der Prismenkamera, so werden in jedem Sternspektrum entsprechende Absorptionslinien erzeugt, die im Gegensatz zu den Sternlinien keine Verschiebung gemäß dem Dopplerschen Prinzip aufweisen, daher dazu dienen können, die Verschiebungen der Sternlinien und damit die Radialgeschwindigkeiten zu ermitteln. Pickering glaubte auf diese Weise die Radialgeschwindigkeit eines Sternes von der 9. Größe mit einer Genauigkeit von $\pm$ 10 km bestimmen zu können. Die zweite Methode besteht in folgendem: Wird zunächst eine Aufnahme in der einen Lage des Prismas gemacht, dann das Prisma um 180° gedreht und eine zweite Aufnahme derselben Himmelsgegend gemacht, so werden von jedem Stern im Gesichtsfeld zwei Spektren erhalten, deren brechbarere Enden entgegengesetzt gerichtet sind. Die Abstände der einander entsprechenden Linien in jedem Paar von Spektren sind, abgesehen von instrumentellen Fehlern, gleich einer für alle Paare gleichen Konstanten plus dem doppelten Betrag der Linienverschiebungen infolge der Radialgeschwindigkeiten. Man erhält also zunächst relative Radialgeschwindigkeiten, die mit Hilfe von Sternen bekannter Radialgeschwindigkeit in absolute verwandelt werden können. Die Instrumentalfehler, deren wichtigste die Distorsion des optischen Systems und der Einfluß von Temperaturschwankungen sind, müssen aus den Aufnahmen selbst, unter Benutzung beider Koordinaten der Spektrallinien, ermittelt werden. Die Theorie der Pickeringschen Reversionsmethode ist von Schwarzschild entwickelt und ihre praktische Ver-

wendung an eigenen Reversionsaufnahmen der Hyaden erläutert worden. Die Genauigkeit einer Radialgeschwindigkeitsbestimmung ergab sich zu $\pm$ 7 km (wahrsch. Fehler). Leider entsprach das erzielte Ergebnis nicht dem Arbeitsaufwand. Sowohl von Pickering wie von Schwarzschild wird eine Kombination der beiden absoluten Methoden empfohlen, wobei die Absorptionslinien des Filters zur Konstantenbestimmung dienen sollen.

Sternspektrograph mit Spalt.

Das wichtigste Mittel zur quantitativen spektralanalytischen Erforschung der Sterne ist der Sternspektrograph mit Spalt, der in seiner Einrichtung sich nicht wesentlich vom Laboratoriumsspektrographen unterscheidet. Er besteht also aus Kollimatorfernrohr mit Spalteinrichtung, einem oder mehreren Prismen und der Kamera. Der Spalt wird in die Fokalebene eines Refraktors oder Reflektors gebracht und parallel der täglichen Bewegung gestellt, so daß die erforderliche Breite der Sternspektren durch eine geringe Veränderung des Ganges des Fernrohruhrwerks erzielt werden kann. Das genaue Festhalten des Sternes auf den Spalt (in bezug auf Abweichungen senkrecht zur Spaltrichtung) geschieht in der Regel jetzt mittels des von den polierten Spaltbacken, deren Ebene gegen die Fokalebene um einige Grade geneigt wird, reflektierten Sternbildes, das, in einem kleinen Fernrohr betrachtet, von dem Spalt durchzogen erscheint. Die Spaltbreite beträgt gewöhnlich unter 0.05 mm, so daß bei großen Fernrohren, die von den Sternen weit größere Fokalbilder entwerfen, nicht unerheblicher Lichtverlust entstehen muß. Größere Spaltbreite erzeugt jedoch beträchtliche Zunahme der zufälligen und regelmäßigen Fehler in den Radialgeschwindigkeitsbestimmungen. Das Kollimatorobjektiv ist in der Regel ein gewöhnliches achromatisches Objektiv, sein Öffnungsverhältnis gleich dem des Refraktors oder Reflektors. Das Prisma oder der Prismensatz wird ein für allemal in das Minimum der Ablenkung für eine bestimmte Wellenlänge gebracht, gewöhnlich für die Wasserstofflinie H_γ. Die Prismen haben in der Regel einen brechenden Winkel von ungefähr 60° und werden aus dem Jenaer Flintglas O 102 oder neuerdings zuweilen aus einem violettdurchlässigeren (O 118 u. a.) hergestellt.

Universalspektrograph.

Während eine Zeitlang das Streben nach einem Universalspektrographen ging, der gestattete, nach Belieben mit der Dispersion von einem bis drei Prismen zu arbeiten, zog man es in neuerer Zeit vor, für jede Dispersion — am meisten gebraucht wird die Dispersion von einem Prisma und von drei Prismen — einen besonderen Apparat zu bauen und nur die Möglichkeit der Verwendung verschiedener Kameraobjektive vorzusehen. Jedoch scheint man in allerletzter Zeit wieder einer Universalkonstruktion zuzuneigen, hauptsächlich wohl in Anbetracht der großen Kosten eines modernen großen Sternspektrographen und der ungünstigen Form der Einprismenapparate, die zur Vermeidung schädlicher Durchbiegungen in komplizierte Traggerüste eingehängt werden müssen. Dem Einfluß der Temperaturschwankungen wird durch Einbauen des ganzen Spektrographen in einen elektrisch heizbaren Kasten mit Thermostateneinrichtung begegnet[55]), wodurch die Temperatur im Innern des Instrumentes automatisch innerhalb 0.1° konstant ge-

Heizbarer Spektrograph.

Vergleichsspektrum.

halten werden kann. Das für die Wellenlängenbestimmungen im Sternspektrum nötige Vergleichsspektrum wird meistens durch einen Metallbogen (Eisen, Eisen-Vanadium, Titan), dessen Licht durch den Sternspektrographen geleitet wird, erzeugt. Damit auf der Platte die Spektren von Sternlicht und Vergleichslicht sich nicht überlagern, ist am Spaltkopf des Kollimators eine besondere Einrichtung getroffen, durch die nach Belieben entweder das Sternspektrum oder das Vergleichsspektrum bzw. beide zur gleichen Zeit auf die photographische Platte entworfen werden können, ohne sich zu stören.[56]) Eine Aufnahme eines Sternspektrums enthält demnach das eigentliche Sternspektrum als einen langen, gewöhnlich $^1/_4$—$^1/_3$ mm breiten Streifen, und zu beiden Seiten desselben, möglichst dicht neben ihm (der Linienkrümmung wegen), die Emissionslinien des Vergleichsspektrums. Die Ausmessung und Auswertung der Sternspektrogramme bietet nichts Besonderes gegenüber der anderer Spektrogramme. Sie erfolgt nach der bekannten Hartmannschen

Hartmannsche Reduktionsformel.

Formel $(s - s_0)(\lambda - \lambda_0)^\alpha = c$, worin λ die gesuchte Wellenlänge einer Linie, s die Mikrometerablesung, λ_0, c, s_0 und α Konstanten sind, die aus vier oder mehr Messungen von Linien bekannter Wellenlänge des Vergleichsspektrums ermittelt werden; in vielen Fällen genügt es, $\alpha = 1$ zu setzen, wodurch die Formel einem von Cornu einmal verwendeten Ausdrucke ähnlich wird.[57])

Spektrokomparator.

Ein sehr wertvolles Hilfsmittel zur schnellen und erschöpfenden Auswertung linienreicher Sternspektren ist der Hartmannsche Spektrokomparator.[58]) Sein Prinzip ist folgendes: Es seien in der gewöhnlichen Weise, mit zwei Vergleichsspektren zur Seite, das Spektrum der Sonne oder besser die Spektren einer Reihe von Fundamentalsternen der Spektralserie mit bereits genau bekannten Radialgeschwindigkeiten mittels desselben Spektrographen aufgenommen, der zu den laufenden Beobachtungen benutzt wird. Das Spektrum des Sternes, dessen Radialgeschwindigkeit bestimmt werden soll, vergleicht man mit demjenigen Fundamentalspektrum, dessen Charakter ihm am nächsten kommt. Die beiden zu vergleichenden Aufnahmen werden durch eine geeignete optische Vorrichtung in dem gemeinsamen Gesichtsfeld des Doppelmikroskops des Spektrokomparators zur Deckung gebracht. Das Fundamentalspektrum wird mittels der Mikrometerschraube so lange verschoben, bis seine Linien mit den Linien des zu untersuchenden Sternspektrums zusammenfallen; darauf werden die Linien der Vergleichsspektren der beiden Aufnahmen zur Koinzidenz gebracht. Der Unterschied der beiden Mikrometerablesungen liefert die gesuchte Radialgeschwindigkeit des Sternes, da die Radialgeschwindigkeit des Fundamentalspektrums bekannt ist. Der Vorteil dieses Verfahrens ist ein doppelter. Zunächst ist die Zeitersparnis bei linienreichen Spektren bedeutend, falls man sich nicht bei der gewöhnlichen Ausmessung nur auf wenige Linien beschränken will; sodann braucht man weiter keine Annahmen über die Wellenlängen der Sternlinien zu machen, die stets mit bedenklichen Willkürlichkeiten verknüpft sind. Will man nur die Schwankungen der Radialgeschwindigkeit eines Sternes

studieren, so kann man die Aufnahmen desselben mit einer aus ihnen ausgewählten vergleichen. Der Einfluß der Krümmung der Spektrallinien wird bei dem Spektrokomparatorverfahren im allgemeinen eliminiert.

III. Forschungsergebnisse. a) Photometrie. Die Helligkeitsverzeichnisse der Fixsterne zerfallen in beobachtungstechnischer Beziehung in drei Hauptklassen sehr verschiedener Genauigkeit. Die erste Klasse umfaßt die auf Einschätzungen in eine Gedächtnisskala, die zweite die auf Vergleichungen der Sterne miteinander nach der Argelanderschen Methode oder einem ähnlichen Verfahren, die dritte die auf wirklichen Messungen beruhenden Helligkeitsverzeichnisse. Auch die Messungen bestehen aus Vergleichungen der Sterne miteinander. Innerhalb jeder Klasse würde noch zu unterscheiden sein zwischen visuellen und photographischen Helligkeiten, die nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar sind, und in der dritten Klasse entspricht jeder Meßmethode im allgemeinen ebenfalls ein besonderer Spektralbereich. Helligkeitsverzeichnisse.

Alle unmittelbaren photometrischen Angaben beziehen sich auf die scheinbare Helligkeit der Sterne. Die absolute Größe oder Helligkeit eines Sternes im astronomischen Sinne ist S. 381 definiert worden. Absolute Helligkeit oder absolute Größe setzen die Kenntnis der Entfernung (Parallaxe) der Sterne voraus. Die scheinbare visuelle Sterngröße der Sonne in der absoluten Skala ist nur ungenau bekannt. In der Harvard-Skala liegt sie wahrscheinlich nahe bei -27.0^m. Dies gibt für die Entfernung der Parallaxe $1'' - 0.43^m$, für die Entfernung der Parallaxe $0.1'' + 4.57^m$. Früher nahm man die Größe der Sonne zu -26.60^m an, man kommt dann für vorstehende Entfernungen sehr nahe auf die runden bequemen Zahlen 0.00^m und 5.00^m. Da an sich die Einheit der absoluten Helligkeiten gleichgültig ist, so wird neuerdings die Annahme dieser Zahlen befürwortet.[59]) Ein Stern von dieser Leuchtkraft würde an Stelle der Sonne die visuelle Größe -26.57^m haben. Seine photographische Helligkeit würde bei gleichem Spektrum mit der Sonne rund 0.7^m kleiner sein. Absolute Größe der Sonne.

Von neueren Helligkeitsverzeichnissen sind besonders hervorzuheben:

Die Bonner Durchmusterung (Argelander, Schönfeld, Krüger), welche alle Sterne bis herab zur Größe 9.5^m nördlich von 23^0 südlicher Deklination enthalten soll, in Wirklichkeit aber noch eine große Zahl erheblich schwächerer Sterne enthält. Die Größen beruhen auf Schätzungen nach einer Gedächtnisskala. Gesamtzahl der Sterne rund 458000. Die Helligkeitsskala der BD ist naturgemäß von einer absoluten weit entfernt, besonders an den beiden Grenzen. Auf Schätzungen beruhende Helligkeitsverzeichnisse.

Die noch unvollendete Cordobaer Durchmusterung (Thome) bildet die Fortsetzung der BD nach Süden. Sie soll alle Sterne bis zur 10. Größe herab enthalten.

Die Uranometria Argentina (Gould) beruht nicht auf einer Gedächtnisskala, sondern auf Vergleichungen mit einem Gürtel besonders bestimmter Hauptsterne. Sie enthält fast 9000 Sterne bis unter die 7. Größe.

Auch die Zonenkataloge der Astronomischen Gesellschaft bergen viel wertvolles Helligkeitsmaterial für die Sterne bis zur 9. Größe. In weit höherem Maße noch ist dies der Fall für Küstners Katalog von 10663 Sternen bis unter die 10. Größe in Nr. 10 der Bonner Veröffentlichungen.

Photographische Helligkeiten liefern die Cape Photographic Durchmusterung (Gill, Kapteyn) mit 455000 Sternen zwischen 18° südlicher Deklination und dem Südpol und die noch unvollendete Internationale photographische Himmelskarte. Erstere umfaßt die Sterne bis zur photographischen Größe 9.2^m vollständig und noch viele schwächere; letztere soll die Sterne bis zur 11. Größe erfassen und wird daher mehrere Millionen Objekte enthalten.

Auf wirklichen visuellen Messungen beruhende Helligkeitsverzeichnisse sind:

Auf Messungen beruhende Helligkeitsverzeichnisse.

Die Kataloge[60]) der Harvard-Sternwarte (Pickering), die Potsdamer Photometrische Durchmusterung (Müller und Kempf), die Ogyallaer Durchmusterung (Tass und Terkán), die Uranometria Oxoniensis (Pritchard).

Genaue photographische Größen geben u. a. die Göttinger Aktinometrie (Schwarzschild) und die Yerkes Actinometry (Parkhurst).[61]) Letztere enthält gewöhnliche photographische und photovisuelle Größen.

Ein vollständiges, auf die absolute Skala oder wenigstens auf eine einheitliche Skala bezogenes Helligkeitsverzeichnis etwa sämtlicher Sterne bis herab zur 9. oder 10. Größe für den ganzen Himmel ist bisher noch nicht vorhanden. Die „Revised Harvard Photometry" z. B. enthält alle Sterne des Himmels bis zur Größe 6.5^m, die Potsdamer Durchmusterung alle Sterne des nördlichen Himmels bis zur Größe 7.5^m, ihre Fortsetzung nach Süden, die Ogyallaer Durchmusterung erstreckt sich bis $-15°$ Deklination. Ebenso sind die photographischen Helligkeitsverzeichnisse nur Bruchstücke. Die Genauigkeit der Angaben der Potsdamer Durchmusterung kann, abgesehen von Systemfehlern, zu etwa 5% angenommen werden, die der Harvard-Kataloge ist durchschnittlich wohl etwas geringer, die der beiden Aktinometrien etwas größer.

Farben- und Farbenäquivalente.

b) Kolorimetrie. Farbenäquivalente. Wie die Helligkeit, so ist auch die Farbe der Fixsterne eine physikalische Eigenschaft, die bereits ohne besondere instrumentelle Hilfsmittel erforscht werden kann. In der Tat sind niemals ausgedehntere Versuche gemacht worden, die Farben der Fixsterne unmittelbar durch Messungen zu bestimmen. Seit dem Vorgange Schwarzschilds und anderer[62]) ist man vielmehr dazu übergegangen, die scheinbare Farbe durch andere, quantitativ leichter bestimmbare Eigenschaften der Sterne zu ersetzen, die man für den Farben äquivalent hielt, nämlich durch die Farbentönung oder den Farbenindex, d.h. das Intensitätsverhältnis zweier verschiedener Spektralbezirke — in der Regel des visuellen und des photographischen —, durch die effektiven Wellenlängen, durch den Spektraltypus. Erst in jüngster Zeit mehren sich die Anzeichen dafür, daß diese Begriffe

doch nicht so ohne weiteres miteinander vertauschbar sind, vor allem laufen die als Eigenschaften des kontinuierlichen Spektrums anzusprechenden Farbenindices und die effektiven Wellenlängen einerseits und die aus dem Charakter der Spektrallinien abgeleiteten Spektralklassen andererseits einander nicht in Strenge parallel. Es spielen hier noch andere, nicht völlig geklärte Faktoren mit hinein, die mit der absoluten Helligkeit oder der galaktischen Stellung der Sterne in irgendeinem Zusammenhang stehen. Man hat umgekehrt versucht, auf diesen Erscheinungen Methoden aufzubauen, die absolute Helligkeit ohne Kenntnis der Parallaxe zu bestimmen.[63])

Farbenverzeichnisse.

Von Farbenverzeichnissen, die auf visuellen Einschätzungen der Farben in eine Gedächtnisskala beruhen, sind hervorzuheben die Potsdamer Durchmusterung, ferner die Farbenkataloge von Sestini, Friedrich Krüger und Osthoff, um deren Bearbeitung bzw. Förderung und zweckmäßige Veröffentlichung J. G. Hagen sich besonderes Verdienst erworben hat. Von diesen drei Katalogen ist der Osthoffsche der genaueste und wertvollste.

Beziehungen zwischen Farbe und Farbenäquivalenten.

Den Zusammenhang zwischen Farbe, Farbenindex und effektiver Wellenlänge, der naturgemäß ein engerer sein muß als der zwischen Spektraltypus (Charakter der Spektrallinien) und Farbe, beleuchten folgende Zusammenstellungen, die verschiedenen Quellen entnommen sind:[64])

Farbe (Osthoff)	λ_{eff} (Bergstrand)	λ_{eff} (Hertzsprung)	Farbe (Osthoff)	λ_{eff} (Bergstrand)	λ_{eff} (Hertzsprung)
0.5°	419 μμ	—	4.5°	431 μμ	426 μμ
1.0	420	414 μμ	5.0	434	429
1.5	421	415	5.5	437	432
2.0	422	416	6.0	441	436
2.5	423	417	6.5	445	440
3.0	424	419	7.0	450	—
3.5	426	421	7.5	455	—
4.0	429	424	8.0	460	—
			8.5	466	—

Die λ_{eff} sind graphisch ausgeglichene Mittelwerte. Die Unsicherheit eines gemessenen λ_{eff} beträgt 5—6 μμ. Der systematische Unterschied zwischen Hertzsprung und Bergstrand rührt wohl im wesentlichen von der Verschiedenheit der benutzten Instrumente, Plattensorten usw. her, die natürlich von großem Einfluß sein muß. Die aus verschiedenen Quellen stammenden λ_{eff} sind daher nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Dies gilt ebenso für Farbenindices und, strenge genommen, für alle photometrischen und kolorimetrischen Beobachtungen. Vorstehende Tabelle ist der Abhandlung von Wirtz entnommen. Lindblads Arbeit ist folgende Vergleichung (S. 398) von nicht ausgeglichenen Mittelwerten von λ_{eff} mit den Farben der Potsdamer Durchmusterung und Osthoffs entnommen.

Die auch anderweitig, z. B. bereits von Schwarzschild in der Göttinger Aktinometrie bemerkte Unregelmäßigkeit der Potsdamer Skala zwischen GW und GW + ist anscheinend individuellen Charakters; in Osthoffs Skala ist sie nicht vorhanden.

Farbe (Potsdam)	λ_{eff} (Lindblad)	Farbe (Osthoff)	λ_{eff} (Lindblad)
W	416.0 μμ	2.16c	415.2 μμ
W +	415.9	2.71	416.5
GW —	416.5	3.19	418.4
GW	422.0	3.63	422.7
GW +	420 8	4.18	425.9
WG —	424.0	4.60	428.9
WG	428.3	5.11	429.4
G —	438.5	5.60	436 2
G	433.3	6.23	441.1
G +	439.7	6.61	441.3
RG — bis RG	441.7		

Internationale Definition des Farbenindex.

Der Nullpunkt der Farbenindices ist nach internationalem Übereinkommen dahin festgesetzt worden, daß der Farbenindex (photographische — visuelle Sterngröße) der Sterne vom Spektrum A_0 und der Helligkeit 5.5^m bis 6.5^m gleich 0.00^m sein soll. Er wird dann für noch frühere Spektralstufen negativ, für die späteren positiv. Die Beziehung auf eine bestimmte scheinbare Größe ist notwendig, weil Skalenfehler der verglichenen Größen voll in die Farbenindices eingehen. Die Farbenindexbestimmungen von King[65]) sind auf dieses internationale System bezogen. Sie zeigen folgenden nicht ausgeglichenen Zusammenhang zwischen Farbenindex und Spektrum. (Bezüglich der Klassifizierung der Spektren vgl. man S. 401 ff.)

Farbenindex und Spektrum.

Spektrum	Farbenindex	Spektrum	Farbenindex	Spektrum	Farbenindex
Oe 5	— 0.22m	A 5	+ 0.19m	G 5	+ 0.98m
B o	— 0.32	F o	+ 0.30	K o	+ 1.10
B 5	— 0.15	F 5	+ 0.42	K 5	+ 1.62
A o	0.00	G o	+ 0 72	M	+ 1.62

In der Göttinger Aktinometrie ist die Beziehung der Farbenindices auf das internationale System noch nicht ausgeführt. Die Farbenindices der Yerkes Actinometry von Parkhurst sind die Differenzen: photographische—photovisuelle Größen. Die photovisuellen Größen sind durch Aufnahmen auf „Cramer trichromatic"-Platten mit einem geeigneten Farbenfilter erhalten. Sie schließen sich den visuellen Größen der Potsdamer Durchmusterung sehr nahe an.

Die Beziehungen zwischen den Farben nach Osthoff und den Farbenindices der Göttinger Aktinometrie gibt die folgende Tabelle wieder:

Farbe (Osthoff)	Farbenindex (Göttingen—Potsdam)	Farbe (Osthoff)	Farbenindex (Göttingen—Potsdam)
1.5c	— 0.62m	5.3c	+ 0.86m
2.1	— 0.35	6.0	+ 1.13
2.7	— 0.05	6.4	+ 1.37
3.9	+ 0.23	6.8	+ 1.62
5.0	+ 0.54	7.3	+ 2.09

Die Darstellung durch die Formel: Farbe (Osthoff) $= 3.25^c + 3.01^c$ (G.—P.) $- 0.522^c$ (G.—P.)^2 ist sehr befriedigend.[66])

Die bisherigen Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen Farbe, Farbenäquivalent und Spektraltypus haben nun immer deutlicher gezeigt, daß diese Eigenschaften zwar eng miteinander verknüpft, aber nicht ohne weiteres vertauschbar sind. Läßt man die zu ungenauen und unbestimmten Farben außer Betracht, so sind zunächst die Beziehungen zwischen dem Spektraltypus und den Farbenäquivalenten nicht eindeutig. Stellt man nämlich die Farbenindices als Funktion des Spektraltypus dar, so ergibt sich eine Kurve, die ein Minimum und ein Maximum hat, ersteres etwa beim Spektraltypus Bo, wie bereits aus der Zusammenstellung der Kingschen Werte (S. 398) ersichtlich ist, letzteres beim Spektraltypus Ma. Die Farbenindices der Sterne von früherem Spektraltypus als Bo haben zum mindesten nicht größere negative Werte als die Sterne vom Typus Bo, und Sterne der späteren Stufen des Spektraltypus M haben nach den bisher vorliegenden lichtelektrischen Messungen entschieden kleinere positive Farbenindices als die Sterne vom Typus Ma. Weit wichtiger noch ist die Frage der Abhängigkeit des Farbenindices von der absoluten Helligkeit, also von einer unabhängigen Variabeln, die an sich in keinerlei Beziehung zum Spektraltypus zu stehen braucht. Sowohl die Untersuchungen von Adams, Seares und Lindblad[67]), wie unveröffentlichte lichtelektrische Bestimmungen des Verfassers zusammen mit K. Bottlinger zeigen scheinbar eine starke Abhängigkeit des Farbenindex von der absoluten Helligkeit: bei gleichem Charakter der Spektrallinien, d. h. bei gleichem Spektraltypus, ist die Helligkeitsverteilung im kontinuierlichen Spektrum der absolut lichtschwachen Sterne sehr merklich verschieden von der der absolut hellen Sterne. In den Spektralklassen G und K sind die absolut schwachen Sterne „weißer" als die absolut hellen derselben Spektralklasse, in den Klassen B und A sind sie „gelber". Etwa beim Spektraltypus F und wahrscheinlich wiederum beim Spektraltypus M schneiden sich die beiden Farbenindexkurven. Es steht noch nicht fest, ob die Lage dieses Schnittpunktes von der Wahl der verglichenen Spektralbezirke abhängt, wie man erwarten sollte. Ob die absolute Helligkeit in Wirklichkeit die bestimmende unabhängige Variabele ist, oder ob noch andere Faktoren in Betracht kommen können, bedarf ebenfalls der weiteren Prüfung.

Nicht-eindeutigkeit der Beziehungen zwischen Farbenindex und Spektrum.

Farbenindex und absoluto Helligkeit.

Dem auf Grund dieses Verhaltens der absolut hellen und schwachen Sterne gemachten Vorschlag von Seares und von Lindblad[68]), durch zwei verschiedene Farbenindices bzw. zwei verschiedene effektive Wellenlängen Spektrum und absolute Helligkeit zugleich zu bestimmen, scheint nach den lichtelektrischen Untersuchungen, wenigstens was die Farbenindices anbetrifft, kein positiver Erfolg beschieden zu sein, indem die Farbenindices, die aus benachbarten Spektralbezirken gewonnen sind, einander sehr nahe parallel verlaufen. Dies müßte in gleicher Weise für die effektiven Wellenlängen gelten. Wenn daher nach den vorläufigen Versuchen von Lindblad die effektiven Wellenlängen die gleichzeitige Bestimmung von Spektrum und absoluter Helligkeit ermöglichen soll, so bedarf dieses Ergebnis noch einer

Bestimmung der absoluten Helligkeit aus Farbenindex und Spektraltypus.

sorgfältigen Nachprüfung, da die Methode der effektiven Wellenlängen beträchtlichen systematischen Fehlern ausgesetzt ist, die von der scheinbaren Helligkeit — daher praktisch auch von der absoluten Helligkeit — abhängen. Dagegen scheint es wohl möglich, aus Farbenindex und Spektraltypus die absolute Helligkeit von Sternen der Spektralklassen G und K mit einer Genauigkeit von einigen Zehnteln einer Größenklasse zu bestimmen, wenn man erst aus Sternen mit bekannter absoluter Helligkeit (bekannter Parallaxe) die notwendige Beziehung erwiesen und festgelegt hat. Aus der so gefundenen absoluten Helligkeit ließe sich natürlich auch die Parallaxe berechnen. Die Unterschiede der Farbenindices von absolut schwachen und hellen Sternen desselben Spektrums sind nach den bisherigen Messungen in der Spektralklasse K recht bedeutend; sie können in extremen Fällen wohl eine Größenklasse erreichen. Es muß aber nochmals betont werden, daß es noch nicht einwandfrei feststeht, ob in der Tat die absolute Helligkeit der bestimmende Faktor für die Unterschiede der Farbenindices von Sternen gleichen Linien-Spektralcharakters ist.

Das Spektrum der Fixsterne und Nebelflecken.

c) Spektroskopie. Die Spektra der Fixsterne sind zusammengesetzte, bestehend aus einem kontinuierlichen Emissionsspektrum und einem darüber gelagerten diskontinuierlichen Absorptions- oder Emissionsspektrum. Die Spektra der Nebelflecke sind teils denen der Fixsterne ähnlich, teils stellen sie sich als Gasspektra mit meistens sehr schwachem kontinuierlichen Grunde dar, der aber niemals ganz zu fehlen scheint. Von den Spektraleinteilungen wird die älteste, die Secchische, auch heute noch gebraucht, wenn es sich nur um eine ganz rohe Bezeichnung des Spektrums handelt. Die beiden Vogelschen Einteilungen sind formal eine Weiterbildung der Secchischen, obwohl sie von einem anderen Gesichtspunkte ausgehen. Gewöhnlich wird heute die zweite Harvard-Einteilung, die Cannonsche, benutzt, daneben auch häufig die erste Harvard-Einteilung, die Maurysche, die vor der Cannonschen den Vorzug hat, daß sie neben dem allgemeinen Charakter des Spektrums besondere Eigentümlichkeiten der Linien berücksichtigt. Im praktischen Gebrauch ist sie aber unbequemer als jene. Für gewisse Untersuchungen kommt noch eine von Lockyer herrührende Einteilung in Betracht, die, obwohl ziemlich gleichzeitig mit der Vogelschen entstanden, sich bereits auf der ganz modernen Anschauung eines aufsteigenden und absteigenden Astes der Sternentwicklung gründet.[69])

Spektraleinteilungen.

Die Secchische Einteilung ging von den Farben der Fixsterne aus, während den übrigen Einteilungen der Gedanke zugrunde liegt, daß die Mannigfaltigkeit der Spektren die verschiedenen Entwicklungsphasen darstellt, die ein Stern vom Gasnebel bis zum schließlichen Erlöschen durchläuft. Alle bisherigen Spektraleinteilungen knüpfen an das diskontinuierliche Linien- und Bänderspektrum unter fast völliger Vernachlässigung der Helligkeitsverteilung im kontinuierlichen Spektrum an. Gewisse charakteristische Linien und Bänder, deren Intensität von Spektralstufe zu Spektralstufe besonders starken Änderungen unterliegt, dienen hauptsächlich zur genauen

Bestimmung des Spektraltypus. Kurz vor dem Kriege ist nach diesem Prinzip auf dem Mount Wilson von Kohlschütter eine quantitative Methode entwickelt und dann von Adams ausgebaut worden, bei der die Intensitäten ausgewählter Linien, solcher, die sich stark, und solcher, die sich wenig oder entgegengesetzt mit dem Spektraltypus ändern, quantitativ miteinander verglichen werden.[70])

Quantitative Bestimmung des Spektraltypus.

Die folgende Tabelle ermöglicht die Vergleichung der verschiedenen Spektraleinteilungen mit Ausnahme der besonders zu betrachtenden Lockyerschen.

Vergleichung der verschiedenen Spektraleinteilungen

Secchi	Vogel	Maury	Cannon	Bemerkungen; Beispiele
(V)	IIb	XXII	Oa, Ob, Oc, Od, Oe	Wolf-Rayet-Sterne; γ Velorum, Harv. Ann. 50 Nr. 2583, Nr. 6249, ζ Puppis od. λ Cephei, 29 Canis maj.
		I	Oe 5	λ Orionis
	Ib	II	B o	ε Orionis
		III	B 1	β Cephei
		IV	B 2	γ Orionis
		IV—V	B 3	π^4 Orionis } Heliumsterne
		V	B 5	η Tauri
		VI	B 8	β Persei
		VI—VII	B 8, B 9	α Delphini
I	Ia	VII	A o	α Lyrae
		VIII	A o	α Geminorum
		IX	A 2	δ Ursae maj.
		X	A 5	α Aquilae
		XI	F o	γ Bootis
		XI—XII	F 2	ζ Leonis
		XII	F 5	α Canis min.
		XII—XIII	F 5	α Persei
		XIII	F 8	α Ursae min.
II	IIa	XIV	G o	α Aurigae, Sonne
		XIV—XV	G 5	β Bootis
		XV	K o	α Bootis, α Cassiopeiae
		XV—XVI	K 2	γ Aquilae
		XVI	K 5	α Tauri
III	IIIa	XVII	M a	β Andromedae
		XVIII	M a, M b	α Orionis, β Pegasi
		XIX	M b	ρ Persei
		XIX—XX	M b, M c	α Herculis, R Lyrae
		XX	M d	o Ceti
IV (VI)	IIIb	XXI	N	19 Piscium
			R	BD — 10°5057, — 3°1685

Kurze Beschreibung der Spektralklassen nach Harvard-Annalen, Band 28 u. 56.

Klasse O.

Beschreibung der Spektralklassen.

In den drei ersten Stufen der Klasse O, Oa, Ob, Oc besteht das Spektrum aus einem kontinuierlichen Untergrunde mit hellen Bändern; dunkle Linien sind gewöhnlich nicht vorhanden. Letztere treten regelmäßig erst in Od auf. In Oa kontinuierliches Spektrum schwach, matte helle Bänder am Ort von H_γ, H_δ und der Heliumlinie 4471.8. Die sogenannte zweite Nebenserie des Wasserstoffes, die neuerdings auf Grund theoretischer Erwägungen von Bohr und experimenteller Untersuchungen von Paschen u. a. dem Helium zugeschrieben werden muß, als Emissionslinien vielleicht vorhanden. Zwei breite helle Bänder bei 4633 und 4688 (?), von denen das zweite schwächer ist. Ein weiteres schwaches Band bei 4059. In Ob sind die Bänder teilweise verschieden von denen in Oa und sehr breit. Die erste und zweite Nebenserie des Wasserstoffs hell vorhanden. Das Band 4688 sehr hell, in demselben eine nahe zentrale

schmale Linie bei 4685.4; zuweilen ist das Band auch doppelt, Trennung jedoch bei größerer Wellenlänge als 4685.4; auch die andern Bänder scheinen zuweilen doppelt zu sein. Ein Band bei 4606 fällt nicht mit dem Bande 4633 der andern Klassen zusammen. Das Band 4059 wohl ausgeprägt. In Oc sind die Bänder dieselben wie in Ob, jedoch viel schmaler. Die beiden Nebenserien des Wasserstoffes hell. Helles mattes Band bei 4471.8 (Helium). Das Band 4688 sehr auffallend, ebenso 4633. Helles Band bei 4514.5; an dieser Stelle in Oe und Oe5 eine dunkle Linie. Die Linie 4059 hell und schärfer als die übrigen Linien. In Od (ζ Puppis) sind alle Linien außer den Bändern 4688 und 4633 dunkel, ihre Definition gut, ihre Zahl sehr gering. Die beiden Wasserstoffserien und die Heliumlinie 4471.8 sind vorhanden und dunkel. Die beiden hellen Bänder schwächer als in Oe; 4688 doppelt. Die Kalziumlinie K ist vorhanden und dunkel. Zweite Wasserstoffserie bis 5414 nachweisbar; schwache Linie bei 5202. In Oe alle Linien dunkel, nur die beiden Bänder 4688 und 4633 hell. Die Zahl der dunkeln Linien viel größer als in Od. Beide Nebenserien des Wasserstoffs und zahlreiche Heliumlinien vorhanden. Die Hauptserie des Heliums nicht nachweisbar. Dunkle Linie bei 4059, 4514.5 und andere. Nach Wolf sind die Spektren der Klasse O beständigen, merklichen Änderungen unterworfen. Von der Klasse O weisen einerseits Zwischenglieder nach den planetarischen Nebeln hin, die in engem physischen Zusammenhang mit den O-Sternen zu stehen scheinen; andererseits bilden die Stufe Oe und die Stufe Oe5 den Übergang zu der Klasse B, den Heliumsternen. Das Spektrum der Nova Aurigae von 1891 und der Nova Persei von 1901 gehört gegenwärtig ebenfalls dem Typus O an. In Oe5 fehlen die beiden hellen Bänder 4633 und 4688. Die zweite Nebenserie des Wasserstoffs wie in Oe, die Heliumlinien wie in Bo. Gut ausgeprägte dunkle Linie bei 4685.4. Ebenso die Kalziumlinie K scharf und kräftiger als in Oe und B.

Klasse B.

Orion- oder Heliumsterne. Alle Linien dunkel. Bo: Zweite Nebenserie des Wasserstoffs schwächer als in Oe5, Heliumlinien sehr kräftig, so daß die erste Nebenserie des Wasserstoffs nicht gleich in die Augen fällt wie bei den späteren Stufen. Eine dunkle Linie 5588. Die Linien 4089.2, 4116.2, 4649.2 in dieser Stufe im Maximum ihrer Intensität. K, und wahrscheinlich auch H, vorhanden. B1: Zweite Nebenserie des Wasserstoffs verschwunden. Heliumlinien sehr ausgeprägt, Zahl der schwachen Linien angewachsen. B2: Heliumlinien im Maximum, K kräftiger als in B1. In den folgenden Stufen nimmt die Intensität der Heliumlinien allmählich ab, die der Wasserstofflinien zu. In B8 treten zuerst Linien des Sonnenspektrums auf: 4233.6, 4173.6 4179.5, 4383.7, 4385.2. In B9 sind noch die Heliumlinien 4026.4 und 4471.8 ziemlich ausgeprägt, letztere tritt auch zuerst in Oe auf. Im übrigen ist das Spektrum ähnlich der folgenden Klasse.

Klasse A.

Die Wasserstofflinien der ersten Nebenserie, H_α, H_β, H_γ ... beherrschen das Spektrum durch ihre große Intensität, dessen Maximum in Ao bis A2 erreicht wird. Die Heliumlinien sind in einigen Sternen der Stufe Ao noch spurenweise vorhanden (z. B. in α Lyrae und in der nachher zu besprechenden Mauryschen Nebenserie c), im übrigen verschwinden sie von nun an ganz, abgesehen von einigen anomalen Spektren. Mit dem Fortschreiten von Ao bis Fo, der folgenden Klasse, nimmt die Intensität der Wasserstofflinien zuerst kaum merklich, später schneller ab, die Intensität der Kalziumlinien H und K und die Zahl der Metalllinien nimmt zu. Unter den letzteren ist zunächst die auffallendste die Magnesiumlinie 4481; später treten die Kalziumlinie 4227, die Linie 4233.6 und andere mehr hervor.

Klasse F.

Die Intensität der Wasserstofflinien nimmt weiter ab, Zahl und Intensität der Sonnenlinien nehmen zu. Das Spektrum nähert sich mehr und mehr dem der Sonne. Jedoch ist das im Sonnenspektrum so charakteristische, bei schwächerer Dispersion kontinuierlich erscheinende Band G (4299—4315) zunächst noch deutlich diskontinuierlich, wird aber mehr und mehr kontinuierlich.

Klasse G.

Sonnenspektrum. Die Kalziumlinien H und K und das Band G sind die auffallendsten Absorptionen des Spektrums. Band G nur bei größerer Dispersion noch diskontinuierlich. Die Wasserstoffserie fällt nicht mehr besonders in die Augen. Ihre Intensität nimmt weiter ab.

Klasse K.

Die Wasserstofflinien sind unter den übrigen Linien ganz unauffällig. Band G ähnlich wie in der Klasse G; 4227 nimmt an Intensität zu, ebenso H und K. Die Intensität des kontinuierlichen Spektrums im Violetten jenseits von G, die bereits in der vorhergehenden Klasse merklich geringer wird, nimmt jetzt stärker ab. Von K5 ab beginnt das allgemeine Aussehen des Spektrums sich entschieden dem des dritten Typus zu nähern. H, K und 4227 sind die stärksten Linien, Band G wird wieder diskontinuierlich. Die Intensität des kontinuierlichen Spektrums ist jenseits der Kalziumlinie K nur noch sehr gering. Die für den dritten Typus charakteristischen Absorptionsbänder, deren Kanten bei 4762, 4954 und 5168 liegen, sind bereits deutlich sichtbar. Diese Bänder gehören dem Titanoxyd an und sind auch in den Sonnenflecken nachgewiesen. Sie deuten offenbar auf niedrige Temperatur hin. Sonnenlinien stärker als in Klasse G.

Klasse M.

Secchis dritter Typus. Die vorhin genannten charakteristischen Absorptionsbänder des dritten Typus sind jetzt wohlausgebildet. Sie sind an der violetten Seite am stärksten und nehmen nach der roten Seite an Intensität allmählich ab. Ihre Ausbildung wird von Ma nach Mb und Mc zunehmend stärker, es tritt ein weiteres Band mit der Kante bei 5445 auf. Die Sonnenlinien nehmen allmählich an Zahl und Intensität ab. Die Intensität der Wasserstofflinien ist wechselnd, in Sternen mit großer absoluter Helligkeit, wie α Orionis, verhältnismäßig groß, bei absolut schwachen Sternen sehr gering. H, K und 4227 sehr auffallend. Der plötzliche Helligkeitsabfall des kontinuierlichen Spektrums bei G, der in der vorhergehenden Klasse so ausgeprägt ist, geht in den späteren Stufen der Klasse M wieder zurück. Die Sterne der Abteilung Md bilden eine besondere Gruppe für sich, die durch das Auftreten heller Wasserstofflinien charakterisiert wird. Diese Gruppe scheint nicht äquivalent den übrigen Spektralstufen zu sein, vielmehr deutet das Auftreten der hellen Wasserstofflinien auf besondere physische Verhältnisse hin. Dies wird durch die Tatsache gestützt, daß alle Sterne der Abteilung Md stark veränderliche Helligkeit haben und fast alle einer ganz bestimmten Klasse von Veränderlichen angehören, deren Prototyp der Veränderliche o Ceti (Mira) ist. Weiter spricht dafür der Umstand, daß das Auftreten der hellen Wasserstofflinien nicht an einen bestimmten Grad der Ausprägung der Merkmale des dritten Spektraltypus gebunden ist, sondern mit den Merkmalen der Klasse K bis Mc verknüpft sein kann. Diesem Umstand trägt die von Fleming (Harv. Ann. 56) eingeführte Unterteilung der Gruppe Md in 11 Stufen, Md1, Md1.5, Md2, Md3 ... Md10, Rechnung.

Klasse N.

Secchis vierter Typus. Die Absorptionsbänder unterscheiden sich von denen der Klasse M durch ihre Lage und dadurch, daß ihre Kanten an der roten Seite liegen. Die beiden stärksten Bänder liegen im photographischen Teil (4640 bis 4750) und zwischen diesem und der Linie D. Die Bänder der Klasse N fallen mit denen des Kohlenwasserstoffs und des Cyans zusammen. Außerdem sind aber auch zahlreiche Linien vorhanden (z. B. die des Kalziums, Chroms und Eisens). Die Wasserstofflinien scheinen zuweilen hell zu sein, vielleicht sind auch noch andere helle Linien vorhanden. Der photographische Teil des kontinuierlichen Spektrums ist außerordentlich schwach und besteht fast nur aus zwei oder drei hellen Stellen, die durch nichtleuchtende Zwischenräume, die Absorptionsbänder, getrennt sind.

Klasse R.

Die Spektren der Klasse R sind im Blauen nicht abgeschnitten gleich denen der Klasse N, sondern erstrecken sich bis zu so kurzen Wellenlängen wie die der Klasse K. Das

Absorptionsband 4640 bis 4750 ist vorhanden, außerdem ein zweites bei 4227. Es ist nicht ausgeschlossen, daß zwischen den Klassen R und N ein kontinuierlicher Übergang mit zahlreichen Zwischenstufen besteht. Wahrscheinlich ist die Farbe der R-Sterne im Gegensatz zu den tiefroten N-Sternen gelb, gleich der des zweiten Typus.

In der Mauryschen Spektralreihe sind einige, nur durch je einen Stern vertretene Zwischenstufen, denen keine besondere Abteilung in der Cannonschen Einteilung entspricht, weggelassen. Ebenso sind in der Cannonschen Einteilung nicht alle Zwischenstufen, wie B4, B6, B7, A6—A8 usw. angeführt. Vogels Unterabteilungen Ia_1, Ia_2, Ia_3, die sich den Harvard-Einteilungen nicht koordinieren lassen, sind ebenfalls nicht berücksichtigt. Spektren mit hellen Linien werden in den einzelnen Einteilungen verschieden behandelt. Vogel, dem Spektren mit beständigen Emissionslinien nur im I. Typus bekannt waren, bezeichnet sie mit Ic_1 und Ic_2, je nachdem nur die Wasserstofflinien oder auch die Heliumlinien hell auftreten. Maury bezeichnet die Spektren vom Heliumtypus mit hellen Linien mit L (lucid), Cannon ordnet sie nach dem Charakter der dunkeln Linien in die normale Reihe ein und versieht den Spektralcharakter mit einem p (peculiar). Die Bezeichnung wird auch für andere starke Abweichungen von der normalen Serie benutzt. Maury gebraucht dafür den großen Buchstaben P. Spektren gemischten Charakters (zusammengesetzte Spektren, deren Komponenten verschiedenen Spektralcharakter haben) bezeichnet Maury mit C, Cannon mit p.

Die Mauryschen Parallelserien.

Von besonderer Bedeutung sind in der Mauryschen Einteilung die Parallelserien. Jede der Mauryschen Klassen II bis XIV zerfällt noch in je drei Unterabteilungen (divisions), die mit *a*, *b*, *c*, bei Zwischenstufen mit *ab*, *ac* bezeichnet werden. Zur Unterabteilung *a* gehören in jeder Klasse jeweilig die Spektren mit normaler Beschaffenheit der Spektrallinien, was ihre Schärfe, Breite und relative Intensität anbetrifft. In der Unterabteilung *b* sind die Linien stark verbreitert und verwaschen, jedoch von normaler relativer Intensität. In der Unterabteilung *c* sind die Wasserstofflinien schmal und scharf, ebenso, wenn vorhanden, die Heliumlinien. Die Intensität der Kalziumlinien H und K ist meistens vermehrt, überhaupt sind die relativen Intensitäten der Metallinien, z. T. auch ihre Wellenlängen, abweichend von denen der Serien *a* und *b*. Die Abweichungen betreffen insbesondere die Linien hoher Temperatur (Funkenlinien, enhanced lines). Der *b*-Charakter dürfte in der Hauptsache auf Dopplereffekt infolge Duplizität und schneller Bahnbewegung oder infolge schneller Rotation oder endlich infolge großer Molekulargeschwindigkeit (hoher Temperatur) der absorbierenden Gase zurückzuführen sein. Jedenfalls hat sich die erstere Vermutung in zahlreichen Fällen bestätigt. Die Serien *a* und *b* sind daher physikalisch nicht wesentlich voneinander verschieden. Dagegen scheint der *c*-Charakter auf abweichende physikalische Verhältnisse hinzudeuten, obwohl auch zuweilen gewisse Anzeichen für zusammengesetzten Charakter des Spektrums (Übereinanderlagerung eines Emissions- und Absorptionsspektrums oder zwei Komponenten) vor-

liegen. In den späteren Abteilungen sowie in I ließ sich die Unterteilung in die Parallelserien nicht durchführen; von XIV ab verschwinden die Merkmale des *c*-Charakters. Entsprechend dem numerischen Verhältnis kann man in den Klassen II bis XIV von einer normalen oder Hauptserie (*a*, *b*) und einer Nebenserie (*c*) sprechen. Daß der Nebenserie *c*, bei schwächerer Ausprägung *ac*, eine besondere Bedeutung zukommt, ergibt sich auch aus verschiedenen anderen merkwürdigen Umständen, auf die Hertzsprung aufmerksam gemacht hat.[71]) Die *c*-Sterne zeigen eine starke Konzentration nach der Milchstraße hin, sie haben fast ausnahmslos sehr kleine Eigenbewegungen und Parallaxen, sind also absolut sehr helle Sterne, da ihre scheinbare Helligkeit durchschnittlich nicht kleiner ist als die der Sterne der anderen Serien. Dies gilt insbesondere auch für die kurzperiodischen Veränderlichen vom δ Cephei- und ζ Geminorum-Typus, die, soweit sie spektroskopisch genauer untersucht worden sind, sämtlich *ac*-Charakter zeigen. Die Radialgeschwindigkeit ist meistens auch sehr klein. Dagegen zeigt sich kein Unterschied in dem Verhalten der *a*- und *b*-Sterne.

Lockyers Spektraleinteilung.

Sehr bemerkenswert sind im Rahmen dieser Betrachtungen auch die Beziehungen zwischen den Mauryschen Parallelserien und der Lockyerschen Spektraleinteilung und den dieser zugrunde liegenden Anschauungen, die, mag man sich auch sonst zu ihr stellen, wie man will, doch zweifellos bereits sehr früh wertvolle Fingerzeige für ein tieferes Verständnis der vorliegenden Tatsachen gegeben haben. Lockyer teilt die Spektren in zwei Gruppen, deren allgemeiner Spektralcharakter im großen ganzen übereinstimmt, die sich aber durch das Verhalten der Linien hoher und niedriger Temperatur voneinander unterscheiden. Den Einteilungen von Vogel, Maury und Cannon liegt die Anschauung zugrunde, daß am Anfang der Sternentwicklung der Gasnebel steht; Lockyer nimmt an, daß die Sterne am Anfang der Entwicklung sehr geringe Dichte und geringe Temperatur besitzen und daß ihre Konstitution die einer Meteoritenwolke ist, die sich allmählich zusammenzieht. Die Temperatur steigt, solange der Wärmegewinn durch die Kontraktion (infolge der Zusammenstöße der einzelnen Teilchen der Wolken) den Strahlungsverlust übersteigt. Später nimmt die Temperatur ab; die Dichte dagegen steigt beständig weiter. Diese Vorstellung hat bereits viele Ähnlichkeit mit den modernen, auf der Strahlungstheorie fußenden Anschauungen. Nach Lockyer stellen also die heißesten weißen Sterne den Höhepunkt der Entwicklung dar, von dem die beiden Äste der Entwicklungskurve ausgehen, der aufsteigende mit Sternen geringer Dichte und zunehmender Temperatur, der absteigende mit Sternen großer Dichte und abnehmender Temperatur. Auf beiden Ästen kommen sämtliche Spektralstufen von B bis M vor, während die Sterne vom Typus N von Lockyer an das Ende der Entwicklung gesetzt werden. Man kann darüber im Zweifel sein, ob diese Einordnung des Typus N berechtigt ist. Auch sonst ist ihm die Scheidung der Sterne in dem beabsichtigten Sinne nicht völlig geglückt. Lockyers Spektralsystem hat folgende Gestalt:

Heißeste Sterne mit einfachster chemischer Beschaffenheit (Argonian and Alnitamian stars); Beispiele γ Argus (O a p), ζ Puppis (O d) ϵ Orionis (B o, *a*).

Aufsteigender Ast der Entwicklung, Sterne steigender Temperatur.		Absteigender Ast der Entwicklung, Sterne abnehmender Temperatur.	
Crucian stars	(β Crucis, B 1, *c*?)	Achernian stars	(α Eridani, B 5, *b*)
Taurian stars	(ζ Tauri, B 3, —)	Algolian stars	(β Persei, B 8, *a*)
Rigelian stars	(β Orionis, B 8, *c*)	Markabian stars	(α Pegasi, A o, *b*)
Cygnian stars	(α Cygni, A 2, *c*)	Vacat	
Vacat		Sirian stars	(α Canis maj., A o, *a*)
Polarian stars	(α Ursae min., F 8, *a c*)	Procyonian stars	(α Canis min., F 5, *a*)
Aldebarian stars	(α Tauri, K 5, —)	Arcturian stars	(α Bootis, K o, —)
Antarian stars	(α Scorpii, M a p, —)	Piscian stars	(19 Piscium, N, —)
Nebulae		Dark stars.	

In den Klammern ist der Prototypstern und seine Spektralklasse nach Cannon nebst der Serienbezeichnung nach Maury angegeben. Man bemerkt, daß auf dem aufsteigenden Ast Sterne der Maury schen Serie *c* und andere Sterne von notorisch großer absoluter Helligkeit Platz gefunden haben, während auf dem absteigenden Ast nur Sterne der Serien *a* und *b* stehen. Auch ist die Tendenz zu mittlerer oder geringer absoluter Helligkeit auf dem absteigenden Ast unverkennbar. Statt des absolut ziemlich hellen α Bootis hätte allerdings besser ein Stern wie 61 Cygni gepaßt, und auch die Sterne vom Typus N scheinen zu den Sternen von großer absoluter Helligkeit zu gehören. Der Übergang von den Nebeln zu den „Antarian stars" ist durch keine bekannten Zwischenstufen belegt. Die Nebel haben nach Lockyer eine niedrige Temperatur. Die Sterne des aufsteigenden Astes unterscheiden sich von denen des absteigenden Astes durch das Vorherrschen der „Funkenlinien" (enhanced lines) der Elemente, also der Linien hoher Temperatur oder großer Energie der Anregung. Die ihnen entsprechenden Elemente sollen einfachste Atombeschaffenheit haben und Lockyer bezeichnet diesen Zustand mit dem Affix „Proto" (z. B. Protomagnesium). Die Protometallinien sind in der aufsteigenden Reihe verhältnismäßig kräftig, die Wasserstofflinien der ersten Nebenserie (H_α, $H_\beta \cdots$) verhältnismäßig schmal. Auf dem absteigenden Ast treten die Bogenspektra der Elemente mehr und mehr hervor. Die Protometallinien sind verhältnismäßig schmal, die Wasserstofflinien verhältnismäßig kräftig. Im Spektrum von α Scorpii ist das Bänderspektrum des Mangan (nach Lockyer), im Spektrum von 19 Piscium das des Kohlenstoffs vorhanden. In den heißesten Sternen (Spektrum O, B) tritt die sogenannte zweite Nebenserie des Wasserstoffs ($H_{\alpha'}$, $H_{\beta'}$, $\cdots$) auf, die von Pickering zuerst im Spektrum von ζ Puppis entdeckt wurde. Die Linie λ 4686 (von Fowler zuerst im Laboratorium hervorgerufen, aber zunächst als erste Linie der ersten Hauptserie des Wasserstoffs angesprochen), die ebenfalls nur bei kräftiger Anregung auftritt, ist als helles Band oder als helle Linie in den Spektren vom Typus O, in den Gasnebeln, in der oberen Chromosphäre der Sonne und in den neuen Sternen beobachtet worden. Die „zweite Nebenserie des Wasser-

stoffs" repräsentiert nach Lockyer einen Zustand weitgehender Dissoziation des Wasserstoffs (Protowasserstoff). Im Laboratorium ist es erst 1912 Fowler gelungen, die ζ Puppis-Serie, die erste Hauptserie und ferner eine zweite Hauptserie des Wasserstoffs hervorzubringen. Von diesen drei Serien ist es aber nach Bohrs Theorie und Paschens experimenteller Untersuchung sehr wahrscheinlich, daß sie dem Helium angehören.[72]) Die erste Linie der zweiten Hauptserie λ 3203 ist bisher in Spektren von Himmelskörpern nicht nachgewiesen; sie liegt nahe an der Grenze des von der Erdatmosphäre noch durchgelassenen Spektrums.

d) Moderne Auffassung der Spektralreihe. Es wird zweckmäßig sein, an Lockyers Spektraleinteilung gleich die Darstellung der neueren Auffassung der Spektralreihe und der Entwicklung der Sterne anzuschließen, die, obwohl von anderen Gesichtspunkten ausgehend, zu merkwürdig verwandten Anschauungen geführt hat. In den ersten hierhin gehörenden Arbeiten von Hertzsprung[73]) wird noch die von Maury aufgestellte Hypothese vertreten, daß die Sterne nicht alle die gleiche Entwicklung durchmachen, sondern zwei (oder mehr) kollaterale Entwicklungsreihen bilden, eine Ansicht, die man auch heute wohl noch nicht als endgültig abgetan betrachten kann. Es entstand nun die Frage, in welcher Weise sich die Sterne der beiden Mauryschen kollateralen Serien *a* und *c* voneinander unterscheiden. Hertzsprung fand als besonders charakteristisches Unterscheidungsmerkmal die absolute Helligkeit; die Sterne der Serie *c* sind absolut beträchtlich heller als die Sterne der Serie *a*. Von der Spektralklasse K ab verschwinden die beschriebenen spektralen Unterscheidungsmerkmale der beiden Serien, dafür treten, wie schon Hertzsprung bemerkt und wie man besonders in den letzten Jahren erkannt hat, andere spektrale Unterschiede auf, die in derselben Weise einen Schluß auf die absolute Helligkeit ermöglichen. Jedenfalls bleibt die Teilung in absolut helle und schwache Sterne auch bei den späteren Spektralklassen bestehen und wird sogar noch ausgeprägter. Beim Fortschreiten nach den früheren Spektralklassen hin wird der Spielraum der absoluten Helligkeiten immer kleiner, so daß in den Spektralklassen B und A praktisch nur absolut helle Sterne vorhanden sind. Hertzsprungs Untersuchungen ergaben also folgendes Bild. Von dem Spektraltypus B ausgehend findet man zunächst große absolute Helligkeit und den Spielraum, innerhalb dessen dieselbe schwankt, verhältnismäßig gering. Dies gilt insbesondere für die Orionsterne (Typus B), die fast alle sehr kleine scheinbare Eigenbewegungen haben und somit sehr weit entfernt sein müssen. Direkte Parallaxenbestimmungen bestätigen dies. Ihre absoluten Helligkeiten sind, da auch ihre scheinbaren Helligkeiten groß sind, demnach sehr bedeutend. Bemerkenswerterweise sind auch die Radialgeschwindigkeiten der B-Sterne durchschnittlich klein. Schreitet man nun in der Spektralreihe längs der Serie *a* fort, so ändern sich die charakteristischen Eigenschaften (Eigenbewegung, absolute Helligkeit) eines gegebenen Sternmaterials mit nach unten begrenzter scheinbarer Helligkeit in der nach

Kollateralserien.

Absolut helle und schwache Sterne.

der gewöhnlichen Anschauung über die Sternentwicklung zu erwartenden Weise. Man gelangt mit fortschreitendem Spektraltypus zu immer geringeren absoluten Helligkeiten, immer größeren Eigenbewegungen (bzw. Parallaxen), indem nur die näheren Sterne ihrer scheinbaren Helligkeit gemäß noch in das nach der scheinbaren Helligkeit begrenzte Material hineinfallen. Daneben tritt nun eine Parallelserie auf, die sich ganz verschieden verhält. Es sind dies in den früheren Klassen bis G insbesondere die *c*- und *ac*-Sterne, in den späteren die hellen roten Sterne. Eigenbewegungen und Parallaxen sind bei den *c*- und *ac*-Sternen fast ausnahmslos, ohne Rücksicht auf den Spektraltypus, sehr klein, die absoluten Helligkeiten folglich sehr groß und durchaus von der Ordnung derjenigen der B-Sterne. Mit dem Typus G bricht der *c*-Charakter plötzlich ab, und gleichzeitig treten die absolut hellen roten Sterne wie γ Draconis, α Orionis, α Scorpii, β Pegasi, α Herculis usw. auf, deren absolute Helligkeiten trotz geringer Flächenhelligkeit (entsprechend der geringen Oberflächentemperatur) denen der B-Sterne nicht nachsteht. Zwischen den roten Sternen der normalen Serie, die etwa durch 61 Cygni (Spektrum K 7) vertreten sind, und denen der hellen Serie klafft bisher eine weite Kluft, indem Zwischenglieder mit einer mittleren Helligkeit ganz oder fast ganz fehlen. In den früheren Spektralklassen G und F ist die Trennung weniger ausgesprochen, und in den Klassen A und B verschwindet sie ganz. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß der naheliegenden Annahme, die sehr hellen roten Sterne seien die Fortsetzung der *c*-Reihe, ein gewichtiger Umstand entgegensteht, auf den bereits Hertzsprung, später auch Eddington[74]) aufmerksam machten. Die Geschwindigkeiten der roten hellen Sterne sind nicht, wie zu erwarten, durchweg sehr klein, sondern zum Teil recht beträchtlich.

Riesen- und Zwergsterne oder Sterne geringer und großer Dichtigkeit.

Was könnte nun die Ursache der großen absoluten Helligkeit der einen Serie sein? Da nichts für das Vorhandensein ungewöhnlich großer Massen unter den Sternen spricht — die größten Massen, die bisher bei Doppelsternen festgestellt wurden, überschreiten nicht das 40fache der Masse der Sonne, die zu der normalen Serie gehört — so bleibt anscheinend nur die Annahme sehr geringer Dichte für die absolut hellen Sterne übrig. Die große Leuchtkraft der absolut hellen Sterne rührt danach von ihrer großen Oberfläche her. Ebenso liegen Anzeichen von Massen, die sehr viel kleiner als die Sonnenmasse sind, bisher nicht vor. Es ist vielmehr erstaunlich, wie gleichförmig in dieser Beziehung die uns zugängliche Sternenwelt organisiert zu sein scheint. Also die *a*-Serie enthält die Sterne mittlerer und großer Dichte, die *c*-Serie und die Serie der hellen roten Sterne diejenigen geringer Dichte. Die von Hertzsprung geprägte Bezeichnung „Zwerge“ und „Riesen“ für die beiden Serien ist demnach, was die Volumina betrifft, sehr treffend. Später hat H. N. Russell die Frage noch eingehender untersucht. Er fand in dem ihm zur Verfügung stehenden Tatsachenmaterial keinen schwachen weißen Stern und keinen roten Stern von mittlerer Helligkeit (etwa von Sonnenhelligkeit), sondern von letzteren nur sehr helle und sehr

schwache. Auch er fand die Trennung in Zwerge und Riesen erst bei etwa dem Spektraltypus F beginnend. Während die absolut hellen Sterne aller Spektralklassen durchschnittlich die gleiche absolute Helligkeit haben, nimmt die der Zwerge pro Spektralklasse im Durchschnitt um etwas mehr als zwei Größenklassen ab. Die Sonne ist sehr nahe typisch für einen Zwerg der Klasse G. Bekanntlich hat die Sonne die für eine Gaskugel enorm hohe Dichte 1.4 (Wasser = 1).

Zuverlässigere Bestimmungen der Dichte sind nur bei den Bedeckungsveränderlichen (Algoltypus, β Lyrae-Typus) möglich. Solche Bestimmungen sind für eine größere Zahl dieser Veränderlichen von Russell und Shapley ausgeführt worden. Hier zeigt sich nun eine bemerkenswerte Bestätigung vorstehender Anschauungen. Während die Dichten der B- und A-Sterne unter diesen Veränderlichen verhältnismäßig nur geringen Spielraum haben (75 % der Sterne haben Dichten zwischen 0.02 und 0.2 der Sonnendichte), gehen die Werte für die späteren Spektralklassen weit auseinander und meiden gleichzeitig die mittleren Werte, wie sie in den Klassen A und B am häufigsten vertreten sind. Es darf aber nicht unerwähnt bleiben, daß diese Teilung in Sterne großer und geringer Dichte sich nicht in den visuellen Doppelsternen mit bekannter Bahn und bekanntem Spektraltypus ausspricht, für die ebenfalls Dichten berechnet werden können.

Auf- und absteigende Entwicklung der Sterne.

Russell geht nun einen Schritt weiter und versucht diese Tatsachen kosmogonisch zu verwerten. Es wird allgemein als sehr wahrscheinlich angenommen, daß die Sterne mit zunehmendem Alter dichter und dichter werden. Folglich können die absolut hellen gelben und roten Sterne nicht am Ende der Entwicklungsreihe stehen, sondern müssen im Gegenteil an den Anfang derselben gesetzt werden. Das Stadium der absolut hellen M-Sterne ist danach das jüngste, ihm folgt das Stadium der absolut hellen K-, G- und F-Sterne; die B- und A-Sterne sind auf der Höhe der Entwicklung und nun folgt die Zwergserie in der gewöhnlichen Reihenfolge der Spektralklassen bis zum Typus M. Die Klassen O, R und N müssen zunächst außer Betracht bleiben. Man sieht, diese Anschauung ist wesentlich die gleiche, die bereits einige Jahrzehnte vorher von Lockyer konzipiert wurde. Die Giganten sind die Sterne steigender, die Zwerge die Sterne fallender Temperatur. Den höchsten Gipfel der Entwicklungskurve, den Spektraltypus B, der die Sterne höchster beobachteter Temperatur enthält, erreichen indessen nicht alle Sterne, sondern nur diejenigen, deren Masse hinreichend groß ist, die also einen hinreichend großen Wärmevorrat besitzen. Damit erklärt sich zwanglos die schon von Ludendorff an den spektroskopischen Doppelsternen gefundene Tatsache, daß die Masse der B-Sterne durchschnittlich beträchtlich größer ist als die der übrigen.[75]) Die Klasse O und die mit dieser physikalisch (spektralanalytisch) eng zusammenhängende Klasse der planetarischen Nebel sind gemäß diesen Anschauungen kaum irgendwo anders unterzubringen als auf dem Gipfel der Entwicklungskurve, wobei jedoch die planetarischen Nebel ähnlich wie die roten Giganten mit ihren durchschnitt-

lich großen Radialgeschwindigkeiten (im Gegensatz zu den schwach bewegten B-Sternen) Schwierigkeiten bereiten. Andere, von Eddington angeführte Schwierigkeiten sind weniger schwerwiegend.[76]) Ferner ist man gezwungen, für diese Himmelskörper, und in geringerem Maße für die O-Sterne, einen dynamisch instabilen Zustand (zur Erklärung der ausgedehnten Gashüllen) anzunehmen, für den eine strenge Begründung noch aussteht. Sehr bemerkenswert sind mit Rücksicht hierauf die offenbaren Beziehungen zwischen den planetarischen Nebeln und den O-Sternen einerseits und den Neuen Sternen andererseits, die später erörtert werden. Die N-Sterne sind zweifellos absolut helle Sterne, gehören demnach gemäß den vorstehenden Anschauungen an den Anfang der Entwicklungsreihe. Über die absolute Helligkeit der R-Sterne ist noch so gut wie nichts bekannt. Die Klassen N und R sprechen wieder mehr für kollaterale Entwicklungsserien.

Zur Illustration vorstehender Betrachtungen mögen einige Zusammenstellungen folgen, die verschiedenen Quellen entnommen sind.[77]) Es bedeutet Z die Zwergserie, R die Riesenserie.

Sterne absteigender Entwicklung.

1. Absolute Helligkeiten von Sternen mit trigonometrisch gemessener Parallaxe. Sonnenhelligkeit = 1.

Stern	Spektrum	Eigenbewegung	Parallaxe	Absolute Helligkeit	Serie
Sirius, helle Komponente	A o	1.32″	0.38″	30.3	—
Sirius, schwache Komponente	A?	1.32	0.38	0.003	Z
Altair	A 5	0.65	0.22	8.63	—
Procyon, helle Komponente	F 3	1.25	0.30	6.95	Z
Procyon, schwache Komponente	?	1.25	0.30	0.00006	Z
α Centauri, Komponente A	G o	3.66	0.76	1.28	Z
α Centauri, Komponente B	K 5	3.66	0.76	0.36	Z
α Centauri, Komponente C	?	3.85	0.78	0.00006	Z
Sonne	G o	—	—	1.00	Z
o(40) Eridani, Komponente A	K 1	4.08	0.20	0.40	Z
o(40) Eridani, Komponente B	A?	4.08	0.20	0.006	Z
o(40) Eridani, Komponente C	A?	4.08	0 20	0.001	Z
ξ Bootis, Komponente A	G 6	0.17	0.23	0 26	Z
ξ Bootis, Komponente B	K 3	0.17	0.23	0.045	Z
61 Cygni, Komponente A	K 7	5.25	0 30	0.064	Z
61 Cygni, Komponente B	K 8	5.25	0.30	0.034	Z
Lac. 21258	Ma	0.58	0 20	0.009	Z
Lal. 21185	Ma	4.76	0.41	0.005	Z
Krüger 60, Komponente A	Mb	0.92	0.26	0.004	Z
Krüger 60, Komponente B	?	0.92	0.26	0.001	Z
Pfeilstern im Ophiuchus	Mb	10 3	0.53	0.0005	Z
η Cassiopeiae, Komponente A	F 9	1.25	0.19	0.99	Z
η Cassiopeiae, Komponente B	—	1.25	0.19	0.026	Z
70 p Ophiuchi, Komponente A	G 9	1.13	0.18	0.63	Z
70 p Ophiuchi, Komponente B	K 7	1.13	0.18	0 13	Z
σ Draconis	G 7	1.84	0.19	0.35	Z
11 Leonis min.	K 1	0.75	0.18	0.20	Z

2. Absolute Helligkeiten von Sternen mit spektroskopisch bestimmter Parallaxe.

Sterne aufsteigender Entwicklung.

Stern	Spektrum	Eigenbewegung	Parallaxe	Absolute Helligkeit	Serie
α Cassiopeiae	G 8	0.06″	0.021″	229.0	R
β Andromedae	Ma	0.22	0.069	22.9	R
α Ursae min.	F 8	0.04	0.050	57.5	R
ρ Persei	Mb	0.17	0.014	158.0	R
α Persei	F 5	0.04	0.048	75.9	R
ε Tauri	G 9	0.12	0.019	100.0	R
α Tauri	K 5	0.20	0.091	43.7	R
ι Aurigae	K 3	0.03	0.025	110.0	R
β Camelop.	F 7 p	0.01	0.010	229.0	R
ε Aurigae	F 5 p	0.01	0.016	132.0	R
α Aurigae	G 1	0.44	0.105	75.9	R
η Geminorum	Ma	0.06	0.041	20.9	R
ε Geminorum	G 8	0.02	0.014	251.0	R
ζ Geminorum	F 8 p	0.01	0.020	63.1	R
β Geminorum	G 9	0 62	0.083	47.9	R
μ Ursae mj.	K 5	0.08	0.052	19.1	R
δ Virginis	Mb	0.48	0.033	30.2	R
Boss 3398	Mc	0.07	0.015	19.1	R
α Bootis	K o	2.28	0.138	43.7	R
ε Bootis, helle Komponente	G 8	0.05	0.021	191.0	R
β Ursae min.	K 4	0.03	0 048	57.5	R
β Coronae bor.	F 2 p	0.19	0.032	33.1	R
α Serpentis	K 1	0.14	0.030	83.2	R
Boss 4096	Ma	0.12	0.019	15.8	R
δ Ophiuchi	Ma	0.16	0.069	13.2	R
α Scorpii	Ma	0.03	0 014	1584.0	R
α Herculis	Mc	0.03	0.014	191.0	R
β Herculis	G 6	0.11	0 026	110.0	R
R Lyrae	Mc	0.08	0.020	47.9	R
δ Sagittae	Ma	0.01	0.040	19.1	R
η Aquilae	F 9	0.01	0.020	63.1	R
β Aquilae	G 8	0.48	0.072	5.25	?
γ Cygni	F 9 p	0.00	0.063	30.2	R
ζ Cygni	G 6	0.06	0.017	145.0	R
τ Cygni	F 1	0.46	0.042	17.4	R
ε Pegasi	K o	0.02	0 028	132.0	R
α Aquarii	G o p	0.02	0.025	83.2	R
β Pegasi	Mb	0.23	0.055	30.2	R
ρ Cassiopeiae	G 4 p	0.01	0.008	145.0	R

Die Sterne α Ursae min., α Persei, ε Aurigae, ζ Geminorum, η Aquilae, γ Cygni, α Aquarii und ρ Cassiopeiae sind *c*- oder *ac*-Sterne. Aus einem Material von 500 Sternen finden Adams und Joy für die beiden Serien folgende mittlere absolute Sterngrößen, reduziert auf die Parallaxe 0.1″ (Sonne = 5.0^m):

Spektrum	Ma—Md	K 9—K 4	K 3—K o	G 9—G o	F 9—F o
Riesen	1.6^m	1.4^m	1.3^m	0.6^m	(1.1^m)
Zwerge	10.8	7.8	6.3	5.3	4.1

Fehlen mittlerer absoluter Helligkeiten in den späteren Spektralklassen.

In den Spektralstufen von K 5 bis M fehlen die mittleren Helligkeiten (um 5^m herum) gänzlich. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß die spektroskopisch bestimmten Parallaxen der Riesensterne in hohem Grade von den nur unsicher bestimmten trigonometrischen Parallaxen der meisten

dieser Sterne abhängen. Zwischen den absolut hellen Sternen mit mäßiger und mit sehr kleiner Eigenbewegung besteht im Durchschnitt anscheinend kein wesentlicher Unterschied der Helligkeit.

Dichten der Bedeckungsveränderlichen.

3. Verteilung der Dichten von Bedeckungsveränderlichen. (Zahl der Fälle für jedes Dichteintervall und jede Spektralklasse.)

Dichte \ Spektrum	B	A	F	G	K	Dichte \ Spektrum	B	A	F	G	K
$>$ 1.00	—	—	—	1	—	0.05 —0.02	2	8	—	—	—
1.00—0.50	—	—	1	—	—	0.02 —0.01	—	3	1	1	—
0.50—0.20	1	10	6	1	—	0.01 —0.001	2	—	—	—	—
0.20—0.10	4	12	1	1	—	0.001—0.0001	—	—	—	2	1
0.10—0.05	3	17	—	—	—	$<$ 0.0001	—	—	1	1	–

Extreme Fälle.

Einige Fälle seien besonders angeführt: SX Cassiopeiae, Spektrum G 3, Dichte 0.0003 der Sonnendichte; RX Cassiopeiae, Spektrum K 0, Dichte 0.0005; RZ Ophiuchi, Spektrum F 8, Dichte 0.001; W Crucis, Spektrum Gp, Dichte 0.000002; ϵ Aurigae, Spektrum F 8 p, Dichte etwa 10^{-8}. Dagegen: U Pegasi, Spektrum F?, Dichte 0.75; W Ursae majoris, Spektrum F 8 p, Dichte der Hauptkomponente 2.8, der Nebenkomponente 1.9; Z Herculis, Spektrum F 2, Dichte der Hauptkomponente 0.3, der Nebenkomponente 0.04. Der Stern ϵ Aurigae ist ein c-Stern und hat die für einen Bedeckungsveränderlichen ganz ungewöhnlich lange Periode von 9905 Tagen. Es können besonders bei den Fällen extrem geringer Dichte Zweifel bestehen, ob die Helligkeitsschwankungen reine Bedeckungseffekte vom Algol- oder β Lyrae-charakter darstellen. Ist dies nicht der Fall, so sind die errechneten Dichten illusorisch. Diese Möglichkeit, die zur Zeit nicht geprüft werden kann, darf nicht außer acht gelassen werden. Ferner ist noch eine andere Möglichkeit in Rechnung zu stellen, nämlich die, daß die Bedeckungsveränderlichen keine für die Gesamtheit der Sterne typischen Fälle sind, wofür einige Anzeichen vorliegen. Ist dies wirklich der Fall, dann gewinnen wir aus diesen Veränderlichen ein ganz falsches Bild von den in der Fixsternwelt vorherrschenden Verhältnissen.

Effektive Sterntemperaturen.

e) Effektive Temperatur der Sterne. Spektralphotometrische Bestimmungen der Strahlung der Sterne sind erst in neuerer Zeit ausgeführt worden.[78]) Wilsing und Scheiner maßen die Energieverteilung im sichtbaren Spektralgebiet, Rosenberg im photographischen. Beide Methoden führten im wesentlichen zu übereinstimmenden Ergebnissen. Von Interesse ist vor allem die Beziehung zwischen der effektiven Temperatur (vgl. oben S. 390) und dem Spektraltypus und den Farbenäquivalenten, ferner zwischen der effektiven Temperatur und der absoluten Helligkeit. Die Existenz letzterer Beziehung ist natürlich nur möglich, wenn die Strahlung keine schwarze ist.

Effektive Temperatur, Spektraltypus und Farbenäquivalent.

Die folgenden Tabellen zeigen den Zusammenhang zwischen Temperatur, Spektraltypus und Farbenäquivalent nach Wilsing. Für die Kon-

stante c_2 der Planckschen Strahlungsformel ist mit Wilsing der Wert 14600 angenommen.[79])

Spektrum nach Adams und Joy Astroph. Journ. 46	Absolute effektive Temperatur	Spektrum nach Maury. Klasse	Absolute effektive Temperatur	Spektrum nach Cannon
F 3.0	6820°	I	14900°	Oe 5
F 7.5	5350	II	8850	B o
G 1.3	5430	III	8540	B 1
G 5.9	4720	IV	10900	B 2
G 8.5	4370	V	10280	B 5
K o.6	4800	VI	10280	B 8
K 3.3	3570	VII	10210	A o
K 5.7	3300	VIII	9120	A o
Ma	3270	IX	9670	A 2
Mb	2970	X	7190	A 5
Mc	3050	XI	7260	F o
		XII	5840	F 5
		XIII	5790	F 8
		XIV	4760	G o
		XV	4190	K o
		XVI	3350	K 5
		XVII	3290	Ma
		XVIII	3050	Mb
		XIX	3050	Mc
		L	7980	B 2 p

Farben-schätzung nach Lau	Effektive Temperatur	Farbenindex nach King	Effektive Temperatur	Effektive Wellen-länge nach Lindblad	Effektive Temperatur
3.31^e	20860°	— 0.255^m	20860°	412.9 μμ	14900°
3.59	16220	— 0.294	16220	418.2	12170
4.01	12480	— 0.035	12370	416.8	10210
3.78	10430	— 0.128	10210	418.4	8960
3.91	8900	— 0.037	8900	419.1	7890
3.82	7810	+ 0.072	7810	421.7	6920
4.34	6890	+ 0.224	6920	424.5	6240
4.58	6210	+ 0.393	6190	425.4	5470
5.11	5620	+ 0.458	5640	428.8	5100
5.63	5000	+ 0.855	5000	429.5	4630
5.87	4660	+ 0.865	4720	431.4	4440
6.00	4350	+ 1.002	4350	434.8	3990
6.19	3990	+ 1.181	3970	435.9	3720
6.39	3730	+ 1.165	3760	444.4	3500
6.67	3510	+ 1.474	3520	447.3	3270
6.48	3350	+ 1.662	3330	442.1	3140
6.81	3090	+ 1.574	3150		

Unsicherheit der Beziehung zwischen Spektraltypus und effektiver Temperatur.

Stellt man diese Zahlen bildlich dar, so erkennt man erstens, daß die Beziehung zwischen der gemessenen Temperatur und dem Spektraltypus nicht linear ist, sondern daß die Temperaturen im Anfang der Spektralreihe einem Maximum, am Ende einem Minimum zutreben; zweitens, daß dagegen die Beziehungen zwischen Temperatur und Farbe bzw. Farbenäquivalent innerhalb der Genauigkeit der Zahlen linear ist, wie auch von vornherein zu erwarten war. Die erstere Feststellung ist in Übereinstimmung mit dem Ergebnis der Vergleichung der Farbenäquivalente mit dem Spektraltypus.

Auch das war zu erwarten. Es scheint daraus die bemerkenswerte Tatsache zu folgen, daß zwischen dem Linien-Spektralcharakter und der Temperatur keine eindeutige Beziehung besteht, daß also aus dem Spektralcharakter allein kein zuverlässiger Schluß auf die effektive Temperatur gezogen werden kann. Dies ist von Wichtigkeit für die folgende Betrachtung.

Kennt man von einem Doppelstern mit bekannter Bahn und bekanntem Massenverhältnis der Komponenten das Spektrum der Komponenten, so kann man mittels der Planckschen Strahlungsformel die Flächenhelligkeit und damit die Radien, also auch die Dichten der Komponenten berechnen.[80]) Man gelangt so teils zu plausibeln, teils aber zu ganz absurden Werten für die Dichten. Dies ist besonders bei zwei Systemen der Fall, bei den Begleitern von Sirius und o^2 Eridani[81]), für die eine Dichte erhalten wird, die viele Tausendmal größer als die Sonnendichte ist. Näheres hierüber später bei den Doppelsternen. In den beiden Fällen ist die absolute Helligkeit der Begleiter in Anbetracht des Spektraltypus (A) auffallend gering (S. 410). Selbst wenn das Spektrum ganz unrichtig bestimmt wäre, was wegen der geringen scheinbaren Helligkeit dieser Sterne, bzw. wegen der Nähe des hellen Hauptsternes, vielleicht angenommen werden könnte, so würden dennoch diese Widersprüche nicht ganz beseitigt werden können. Es folgt hieraus, daß die auf die beschriebene Weise erhaltenen Flächenhelligkeiten sehr weit von der Wahrheit entfernt sein können, daß also zwischen Spektraltypus einerseits und gemessener effektiver Temperatur und Flächenhelligkeit andererseits kein eindeutiger Zusammenhang besteht. Wesentlich ist vielleicht der Umstand, daß die Sterne, deren effektive Temperaturen bestimmt worden sind, fast ausnahmslos absolut helle sind, während die Fälle, in denen unmöglich oder unwahrscheinlich hohe Dichten gefunden wurden, sich auf absolut schwache Sterne beziehen.

Bestimmung der absoluten Helligkeit aus der Intensität gewisser Spektrallinien.

f) Spektroskopische Bestimmung der absoluten Helligkeit. Eine sehr aussichtsreiche Methode, absolute Helligkeiten ohne Kenntnis der Parallaxe zu bestimmen, ist in den letzten Jahren von Adams und Kohlschütter ausgearbeitet worden.[82]) Bereits Hertzsprung hatte auf eine Strontiumlinie (4077.9) hingewiesen, die in den dem Sonnentypus nahestehenden Spektren stärker erscheint als im Sonnenspektrum, wenn die absolute Helligkeit groß ist.[83]) Ferner geben Adams und Kohlschütter an, daß in den Spektren zweier schwacher A-Sterne mit ungewöhnlich großer Eigenbewegung die Magnesiumlinie 4481 äußerst schwach gefunden wurde.[84]) Dann fand kurz vor dem Kriege Kohlschütter bei Gelegenheit seiner bereits erwähnten quantitativen Bestimmungen des Spektraltypus einige Linien, deren Intensität bei gleichem allgemeinen Spektralcharakter von der absoluten Helligkeit abzuhängen schien. Dieser Zusammenhang wurde dann anfangs von Adams und Kohlschütter, später von ersterem allein systematisch erforscht und auf ihm eine spektroskopische Methode der Bestimmung der absoluten Helligkeit begründet, die allerdings auf die früheren Spektralklassen B und A nicht anwendbar ist. Das Prinzip ist sehr einfach. Es werden zunächst

Sterne der Klassen F bis M mit bekannter Parallaxe, also bekannter absoluter Helligkeit, ausgewählt und deren Spektraltypus nach der quantitativen Methode möglichst genau bestimmt. Dann werden die Spektren von je zwei Sternen des gleichen Spektraltypus, jedoch sehr verschiedener absoluter Helligkeit, miteinander verglichen und die Linien herausgesucht, deren relative Insensität in den beiden Sternen verschieden war. So sind z. B. die Wasserstofflinien in den Spektren der absoluten hellen Sterne der Spektralklasse M verhältnismäßig viel kräftiger als in den Spektren der absolut schwachen M-Sterne. Die Kalziumlinie λ 4455 ist sehr kräftig in den absolut schwachen K-Sternen, verhältnismäßig schwach in den absolut hellen K-Sternen; umgekehrt ist die Strontiumlinie λ 4216 schwach in ersteren, stark in letzteren. Die Linie λ 4455 gehört zu den Linien, die im Sonnenfleckenspektrum sehr verstärkt sind, die Linie λ 4216 ist eine Funkenlinie. Diese Linien wurden nun mit benachbarten unempfindlichen Linien verglichen und die Beziehung zwischen der relativen Intensität der Linien und der absoluten Helligkeit der Sterne ermittelt. Diese Beziehung läßt sich dann dazu benutzen, um auch die absolute Helligkeit von Sternen mit unbekannter Parallaxe zu bestimmen. Die Vergleichung der absoluten mit der scheinbaren Helligkeit liefert dann weiter die Parallaxe. Die Methode scheint einer nicht unerheblichen Genauigkeit fähig zu sein; Adams gibt als mittlere Abweichung zwischen den spektroskopisch und trigonometrisch bestimmten Parallaxen $\pm 0.026''$ an. Von besonderem Interesse ist die statistische Untersuchung des auf diese Weise gewonnenen umfangreichen Materials. Werden zu den absoluten Helligkeiten als Abszissen die Häufigkeiten des Vorkommens als Ordinaten eingetragen, so erhält man für die verschiedenen Spektralklassen Häufigkeitskurven, die deutlich die Zweiteilung der Spektralreihe in absolut helle und schwache Sterne zeigen. Diese Zweiteilung ist im Typus F nur schwach angedeutet, von G 0 bis K 3 bereits sehr ausgeprägt, ohne daß jedoch Sterne mittlerer Helligkeit ganz fehlen, und in den späteren Spektralstufen derart ausgebildet, daß die mittleren absoluten Helligkeiten (4^m bis 6^m für die Parallaxe $0.1''$) vollständig abwesend zu sein scheinen. In der Klasse G sind die Maxima der Häufigkeit um etwa $4^1/_2$, in den Stufen K 0 bis K 3 um 5, in den Stufen K 4 bis K 9 um 7, in der Klasse M endlich um volle 9 Größenklassen voneinander verschieden, d. h. die absolut hellen M-Sterne sind durchschnittlich um 9 Größenklassen heller als die absolut schwachen M-Sterne. Auffallend ist, daß in der Klasse F die absolut schwachen Sterne weitaus überwiegen. Ob die absolut hellen Sterne vom Spektraltypus F in Wirklichkeit sehr selten sind, oder aus irgendeinem Grunde unbeabsichtigt außerhalb des Rahmens der Untersuchung geblieben sind, steht noch dahin.[85])

Die Zweiteilung der Spektralreihe, geschlossen aus den spektroskopischen Parallaxen.

Die Ursache der spektralen Unterschiede der absolut hellen und schwachen Sterne wird in der Verschiedenheit des physikalischen Zustandes (Dichte, Temperatur, Höhe der Atmosphäre usw.) liegen. Im Laboratorium zeigen die zur Bestimmung der absoluten Helligkeit herangezogenen Linien starke

Ursachen der spektralen Unterschiede der Riesen- und Zwergsterne.

Abhängigkeit von der Dichte und Temperatur. In den absolut hellen Sternen sind die Wasserstofflinien und die Funkenlinien ungewöhnlich kräftig, in den absolut schwachen Sternen die Linien niedriger Temperatur, mit Einschluß der Kalziumlinie λ 4227, die auch, im Gegensatz zu den Kalziumlinien H und K, im elektrischen Ofen sich bezüglich ihrer Intensität sehr abhängig von der Dampfdichte zeigt. Das kontinuierliche Spektrum ist bei ersteren im Blauen und Violetten verhältnismäßig schwach, bei letzteren verhältnismäßig hell: die Riesen sind im allgemeinen gelber als die Zwerge derselben Spektralstufe.

Allgemeine Absorption im Ultraviolett bei den Sternen früher Spektralklassen.

Im Anschluß an die bisherigen spektralanalytischen Betrachtungen, obwohl vielleicht nicht in innerem Zusammenhang mit ihnen, muß noch einer Beobachtung gedacht werden, die von großem atomtheoretischen Interesse ist. Hartmann fand in den mit einem Quarzspektrographen erhaltenen Spektren der Sterne mit vorherrschendem Wasserstoff (späterer B-Typus und Typus A bis F) eine ziemlich plötzlich einsetzende allgemeine Absorption im Ultraviolett, die vor dem Ende (λ 3646) der ersten Nebenserie des Wasserstoffs — genauer bei λ 3800 — beginnt und sich bis etwa λ 3400 erstreckt, also nicht durch das Zusammenfließen der am Ende der Serie sehr dicht gedrängten Wasserstofflinien hervorgerufen werden kann. Diese Erscheinung ist bei den früheren Heliumsternen nur schwach angedeutet und fehlt bei den Sternen der Spektralklassen G und K völlig, bei denen die Abnahme der Helligkeit gegen das ultraviolette Ende des Spektrums gleichmäßig fortschreitet. Eine frühere Erwähnung der Erscheinung findet sich in Huggins' Atlas von Sternspektren. Auf die Bedeutung dieses Befundes im Zusammenhang mit den auf Bohr zurückgehenden Theorien des Atombaues macht Debye aufmerksam.[86]) Man hatte bereits eine ähnliche Erscheinung im Spektralgebiet der Röntgenstrahlen festgestellt und sich von dem Zustandekommen desselben auf Grund des Bohrschen Atommodelles Vorstellungen gemacht, die diese Erscheinung auch im optischen Spektralgebiet erwarten ließen.

g) Spektroskopische und visuelle Doppelsterne. Von verhältnismäßig geringerem astronomischen Interesse, von gewissen Fällen abgesehen, ist zur Zeit die möglichst vollständige Identifizierung der in den Sternspektren vorkommenden Linien und Bänder mit Linien bekannter Elemente und deren Verbindungen. Auf die hiermit zusammenhängenden Fragen, so wichtig sie auch an sich sind, soll daher nicht eingegangen werden. Um so mehr steht die Frage nach denjenigen Einflüssen im Vordergrund des Interesses, welche Veränderungen der Wellenlängen der Sternlinien hervorrufen können. Solcher Effekte sind mehrere zu nennen: der Doppler-Effekt, der Druckeffekt, der Zeeman- und Stark-Effekt, der Einsteinsche Gravitationseffekt. Der Doppler-Effekt rührt von der Komponente der Bewegung des Gestirns und des Beobachters her, die in die Verbindungslinie: Gestirn — Beobachter fällt. Die Verschiebungen der Spektrallinien infolge des Druckes, unter dem die emittierenden und absorbierenden Dämpfe der Sternatmosphären stehen, rühren her von einer Verschiebung des Intensitätsmaximums der Spektral-

Doppler-Effekt und Druckeffekt.

linien. Die Verschiebung geht in der Regel mit wachsendem Druck nach dem roten Ende des Spektrums, bei manchen Linien aber auch nach der entgegengesetzten Seite; auch gibt es Linien, die nur schwach oder überhaupt nicht beeinflußt werden. Hand in Hand damit geht in der Regel eine Verbreiterung der Linien, die symmetrisch oder einseitig sein kann. Endlich wird durch den Druck die relative Intensität der Linien beeinflußt. Diese Erscheinungen sind dazu benutzt worden, den Versuch einer Bestimmung der in den Sternatmosphären herrschenden Drucke zu machen. Fabry und Buisson fanden mittels Interferenzmethode aus der Vergleichung der Wellenlängen im Sonnenspektrum mit denen im Bogen den Druck in der umkehrenden Schicht der Sonne zu 5—6 Atmosphären. Dagegen bestreitet Evershed die Existenz so großer Drucke in der unserer Beobachtung zugänglichen Atmosphäre der Sonne.[87]) Abgesehen von der Sonne, auf die große Dispersion anwendbar ist und bei der man auch einzelne besonders stark gestörte Stellen der Oberfläche untersuchen kann, spielen bei den Fixsternen, deren Spektren naturgemäß im allgemeinen nur mit geringer Dispersion untersucht werden können, Druck-, Zeeman- und Stark-Effekt, die im Gesamtspektrum auch bei der Sonne kaum nachweisbar sind, praktisch keine Rolle.

Auf dem Doppler-Effekt beruhende Erscheinungen. Radialgeschwindigkeiten der Sterne.

Der Doppler-Effekt kann sich in den Sternspektren in verschiedener Weise bemerkbar machen: erstens durch symmetrische oder asymmetrische Verbreiterung der Linien infolge der Geschwindigkeit der emittierenden und absorbierenden Gasmoleküle, infolge Strömungen in den Sternatmosphären und infolge der Rotation des Sternes; zweitens durch Verschiebungen der ganzen Linien infolge der relativen Geschwindigkeitskomponente des Sternes zum Beobachter. Letztere Erscheinung ist astronomisch die weitaus wichtigste. Sie gibt uns Aufschluß über den Bewegungszustand der Gestirne liefert uns allerdings nur die in die Gesichtslinie fallende Komponente der Geschwindigkeit, die Radialgeschwindigkeit. Häufig ist die Radialgeschwindigkeit nicht konstant, sondern periodischen Schwankungen unterworfen, nämlich dann, wenn der untersuchte Stern einen nahen Begleiter hat, mit dem er ein enges Doppelsternsystem bildet. In solchen Systemen ist meistens die scheinbare Entfernung der Komponenten so gering, daß eine direkte Trennung im Fernrohr nicht möglich ist. Man spricht dann von spektroskopischen Doppelsternen im Gegensatz zu den visuellen, die im Fernrohr getrennt gesehen werden können. Eine strenge Scheidung zwischen spektroskopischen und visuellen Doppelsternen läßt sich nicht durchführen, da einerseits die Bahnbewegung der visuellen Doppelsterne mit kurzer Umlaufszeit auch spektroskopisch feststellbar ist, andererseits einige spektroskopisch aufgefundene Doppelsterne nachträglich auch visuell getrennt werden konnten (α Aurigae, ν Geminorum). Wenn auch Anzeichen dafür vorliegen, daß zwischen den engen spektroskopischen Doppelsternen von wenigen Tagen Umlaufszeit und den visuellen Systemen, deren Umlaufszeit stets nach Jahren zählt, ein genetischer Unterschied besteht, so sollen doch beide Klassen zusammen betrachtet werden. Dabei ist allerdings noch zu berücksichtigen, daß auch

Spektroskopische und visuelle Doppelsterne.

die Beobachtungsmethode wesentliche Unterschiede nach sich zieht. Die spektroskopischen Beobachtungen können naturgemäß nicht die wahre Bahn, sondern nur deren Projektion auf die Gesichtslinie liefern. Bezeichnet man die große Halbachse der Bahn der untersuchten Komponente des Systems in bezug auf den Schwerpunkt des Systems mit a, die Neigung der Bahnebene gegen die zur Gesichtslinie senkrechten Ebene mit i, so erhält man also aus den Linienverschiebungen $a \sin i$ in Kilometern. Die spektroskopischen Beobachtungen liefern ferner die Exzentrizität e der Bahn und die Zeit T des Periastrondurchganges (Zeit der kleinsten Entfernung der Komponenten vom gemeinsamen Schwerpunkt), den Winkel ω zwischen dem aufsteigenden Knoten und dem Periastron, gezählt in der Richtung der Bahnbewegung, endlich eine Beziehung zwischen den Massen der Komponenten und der Sonnenmasse. Unter dem aufsteigenden Knoten ist derjenige Schnittpunkt der Bahn mit der durch den Schwerpunkt des Systems senkrecht zur Gesichtslinie gelegten Ebene zu verstehen, den die betrachtete Komponente von diesseits dieser Ebene nach jenseits durchschreitet. Die Umlaufszeit P ist natürlich dasjenige Element, dessen Bestimmung zuallererst ausgeführt werden muß. Sind im Spektrum nur die Linien einer der beiden Komponenten sichtbar und meßbar, so liefern die Beobachtungen nur die Bewegung dieser um den Schwerpunkt des Systems und bezüglich der Massen nur den in Einheiten der Sonnenmasse gemessenen Ausdruck $f(m_1, m_2) = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$, worin m_1 und m_2 die Massen der sichtbaren bzw. unsichtbaren Komponente bedeuten. Sind die Linien beider Komponenten meßbar, so liefert jede Radialgeschwindigkeitsbestimmung derselben das Massenverhältnis $m_1 : m_2$ und bei bekannter Geschwindigkeitskurve $m_1 \sin^3 i$ und $m_2 \sin^3 i$.

Spektroskopische Bahnelemente der Doppelsterne.

Mikrometrische Bahnelemente der Doppelsterne.

Die Mikrometermessungen an einem visuellen Doppelstern liefern die Umlaufszeit, die scheinbare große Halbachse der wahren Bahn in Bogenmaß (Bogensekunden), die Exzentrizität, die Zeit des Periastrondurchganges, den Winkel zwischen der Verbindungslinie der Knoten und der großen Halbachse, endlich die Neigung der Bahnebene, jedoch mit der Unbestimmtheit, daß aus den Mikrometermessungen nicht ermittelt werden kann, welcher Teil der Bahn vor, welcher hinter der durch den Schwerpunkt des Systems senkrecht zur Gesichtslinie gelegten Ebene liegt. Infolgedessen ist es auch unbestimmt, welcher der beiden Knoten der aufsteigende ist. Man gibt den Positionswinkel desjenigen Knotens an, für den er kleiner als 180^0 ist. Ist durch die Messungen die Bewegung einer Komponente in bezug auf die andere bestimmt worden, so entspricht die Dimension der Bahn der Summe der Massen, $m_1 + m_2$. Ist die Bewegung jeder Komponente um den Schwerpunkt des Systems, z. B. durch Anschluß an einen nicht zum System gehörenden Nachbarstern, bestimmt worden, so ist das Massenverhältnis $m_1 : m_2$ gegeben. Ist die Parallaxe des Systems bekannt, so sind $m_1 + m_2$ bzw. m_1 und m_2 in Einheiten der Sonnenmasse zu ermitteln. Ist nur eine Kompo-

nente sichtbar, so kann nur deren Bewegung in bezug auf den Schwerpunkt des Systems ermittelt werden. Dieser Fall lag früher beim Sirius und Procyon, sowie bei ε Hydrae vor, als man deren schwache oder sehr nahe Begleiter noch nicht unmittelbar festgestellt hatte. Ferner liegt er vor bei der dritten Komponente des dreifachen Sternes ζ Cancri, bei der hellen Komponente des Doppelsternes ξ Ursae majoris und bei einigen anderen Doppelsternen. Die durch die periodischen Störungen der Bewegung der sichtbaren Komponenten dieser Systeme nachgewiesene Existenz noch einer dunkeln oder schwachleuchtenden Komponente hat bisher direkt noch nicht bestätigt werden können. Bei ξ Ursae majoris ist die dritte Komponente jedoch spektroskopisch nachgewiesen. Liegen von einem System außer der visuellen Bahn auch noch Radialgeschwindigkeitsbestimmungen, oder umgekehrt außer der spektroskopischen Bahn auch visuelle Messungen vor, so ist dasselbe samt seiner Parallaxe vollständig bestimmt. Ist bei einem spektroskopisch bestimmten System die Neigung i der Bahnebene so groß, daß gegenseitige Bedeckungen der Komponenten stattfinden, so liegt der Fall einer Bedeckungsveränderlichen vom Algol- oder β Lyrae-Typus vor. Aus dem Verlauf der durch die Bedeckungen erzeugten Schwankungen der scheinbaren Gesamthelligkeit des Systems, d. i. aus der Lichtkurve, läßt sich dann die Neigung ermitteln. Solche Systeme sind bestimmt bis auf die Lage der Bahn im Raum, die absoluten und die Flächenhelligkeiten der Komponenten. In diesem letzteren Falle liefern die photometrischen Daten die wahren Dimensionen der beiden Komponenten und ihre Dichten. Die photometrischen Daten allein, ohne die spektroskopischen, liefern eine mittlere Dichte für die beiden Komponenten.

Unsichtbare Begleiter in visuellen Doppelsternsystemen.

Große Neigung der Bahnebene gegen die Sphäre.

Da nur für sehr wenige Systeme gleichzeitig die visuellen und spektroskopischen Daten vorliegen und die Bedingungen für Bedeckungsveränderlichkeit naturgemäß nur selten erfüllt sind, so ist man für die Aufsuchung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten unter den Doppelsternen auf statistische Methoden angewiesen. In Ermangelung der Kenntnis der individuellen Bahnneigungen in den spektroskopischen Systemen z. B. nimmt man für $\sin^3 i$ seinen wahrscheinlichsten Wert, der mit Berücksichtigung des Umstandes, daß aus beobachtungstechnischen Gründen kleine i unter den bekannten Systemen seltener sein werden als große, zu 0.65 angesetzt wird. Der theoretische wahrscheinlichste Wert von $\sin^3 i$ bei unendlich vielen, nach dem Zufall verteilten Bahnen würde 0.59 sein.

Statistische Untersuchungen der Bahnelemente.

Die folgenden Tabellen enthalten zunächst einige ausgewählte visuelle und spektroskopische Doppelsternsysteme, ferner Zusammenstellungen, welche gewisse allgemeine Gesetzmäßigkeiten veranschaulichen sollen.[88]) Bei mehr als zwei Komponenten werden dieselben in der Reihenfolge der Helligkeit mit A, B, C... bezeichnet. Wenn das Spektrum beider Komponenten bekannt ist, ist es angegeben. Der Ort von Krüger 60 für 1900 ist $\alpha = 22^h\,24.4^m$, $\delta = +57^0\,12'$. Die bisher kürzeste Umlaufszeit hat also δ Equulei, dessen Duplizität von O. Struve bereits 1852 entdeckt wurde.

Bemerkungen zu den Doppelsterntabellen.

Visuelle Doppelsterne.

Einige visuelle Doppelsterne.

Sterne	Helligkeit d. beiden Komp.	Spektrum (Harvard)	P (Jahre)	a	e	i	Berechner der Bahn
δ Equulei AB	5.3^m, 5.4^m	F 5	5.7	0.27″	0.39	81.0°	Aitken
κ Pegasi AB	5.0, 5.1	F 5	11.4	0.29	0.49	77.5	Lewis
ε Hydrae AB	3.7, 5.2	F 8	15.3	0.23	0.65	50.0	Aitken
ζ Sagittarii	3.4, 3.6	A 2	21 2	0.56	0.18	69.4	Aitken
ζ Sagittae AB	5.4, 6.4	A 0	25.2	0.32	0.85	78.1	van Biesbroeck
42 Comae Beren.	5.2, 5.2	F 5	25.3	0.67	0.50	90.0	Doberck
85 Pegasi AB	5.8, 11.0	G 0	26.3	0.82	0.46	53.1	Bowyer u. Furner
β Delphini AB	4.0, 5.0	F 5	26.8	0.48	0.35	62.2	Aitken
ζ Herculis	3.0, 6.5	G 0	34.5	1.35	0.46	47.5	Comstock
Procyon	0.5, 13.5	F 5	39 0	4.05	0.32	14.2	L. Boss
η Coronae bor.	5.6, 6.1	G 0	41.6	0.89	0.27	58.5	Lohse
μ Herculis BC	10.0, 10.5	Mb	43.2	1.30	0.20	63.2	Aitken
ξ Scorpii AB	4.8, 5.1	F 8	44.7	0.72	0.75	29.1	Aitken
Krüger 60 AB	9.1, 10.5	Mb	46.6	2.55	0.33	29.9	Pavel u. Bernewitz
τ Cygni AB	3.8, 8.0	F 0	47.0	0.91	0.22	42.7	Aitken
Sirius	— 1.6, 8.5	A 0, A?	49.3	7.55	0.59	44.6	Lohse
99 Herculis	5.2, 10.5	F 8	53.5	1.11	0.76	38.3	Lohse
ξ Ursae maj.	4.4, 4.9	G 0	59.8	2.51	0.41	53.4	Nörlund
ζ Cancri AB	5.6, 6 3	G 0	60.1	0.86	0.34	0.0	Doberck
α Centauri	0.3, 1.7	G 0, K 5	78.8	17.65	0.51	79.0	Lohse
70 p Ophiuchi	4.1, 6.1	K 0	87.7	4.50	0.50	58 7	Pavel
γ Coronae bor.	4.0, 7.0	A 2	87.8	0.73	0.42	84.2	Lewis
ε Equulei AB	5.8, 6.3	F 5	97.4	0.61	0.72	85.5	Russell
γ Virginis	3.6, 3.7	F, F	182.3	3.74	0.89	29.9	Doberck
τ Ophiuchi	5.3, 6.0	F 0	223.8	1.31	0.53	66.1	Doberck
Castor	2.0, 2.8	A, A	346.8	5 76	0.44	63.6	Doberck

In der nachstehenden Zusammenstellung bedeutet K den halben Unterschied zwischen dem positiven und negativen Maximum der Radialgeschwindigkeit, ist also die Amplitude der Schwankung der Radialgeschwindigkeit. Sind beide Komponenten im Spektrum sichtbar und meßbar, so sind K, $a \sin i$ und ω für beide Komponenten A, B gegeben. Statt der Massenfunktion $f(m_1, m_2) = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$ sind in diesem Falle $m_1 \sin^3 i$ und $m_2 \sin^3 i$ gegeben. Die Größe V_0 ist die Geschwindigkeit des Schwerpunktes des Systems in der Gesichtslinie, positiv, wenn das System sich von uns entfernt, negativ, wenn es auf uns zukommt. In einigen Fällen ist die Schwerpunktsgeschwindigkeit nicht konstant, sondern selbst wieder periodisch veränderlich. Dies zeigt das Vorhandensein einer dritten Komponente C an, mit der die Komponenten A, B um einen gemeinsamen Schwerpunkt sich bewegen. Solche Fälle sind durch das Symbol A, C gekennzeichnet, z. B. β Persei A, C. Stark veränderliche Helligkeit ist durch „var.“, schwach veränderliche Helligkeit (Schwankung nicht über 0.2^m) durch das Zeichen ± gekennzeichnet. Die Helligkeitsschwankungen hängen in allen nachstehenden Fällen mit den Schwankungen der Radialgeschwindigkeit zusammen, haben also die gleiche Periode wie diese.

Die Duplizität von β Cephei, dessen Periode nächst der von g Ursae majoris unter allen spektroskopischen Doppelsternen bisher als die kürzeste bekannt ist, wurde von Frost entdeckt. Eine noch kürzere Periode als selbst

Einige spektroskopische Doppelsterne.

Spektroskopische Doppelsterne.

Stern	Helligkeit	Spektrum	P (Tage)	K (Kilometer)	$a \sin i$ (Millionen Kilom.)	e	ω	V_0 (Kilom.)	$f(m_1, m_2)$ (Sonnenmassen)	Berechner
β Cephei	$3.3^m \pm$	B 1	0.190	15.8	0 041	0.04	2.6^0	− 14.1	0.000078	Crump
12 Lacertae	5.2 ±	B 2	0.193	16.9	0.045	0.00	—	− 13.8	0.0001	Young
σ Scorpii	3.1	B 1	0.247	39.0	0.129	0.05	110.0	+ 2.0	0.0014	Selga
RR Lyrae	var.	F	0.567	22.2	0.167	0.26	110.8	− 68.3	0.00057	Prager
R Canis maj.	var.	F	1.136	28.6	0.443	0.14	195 9	− 39.7	0.0027	Jordan
b Persei A	4.6	A 2	1.527	41.9	0.838	0.22	151.8	+ 23.1	0.78	Cannon
b Persei B				152.5	3.048		331.8		0.22	
u Herculis A	var.	B 3	2.051	99.5	2.800	0.05	66.2	− 21.2	6.67	Baker
u Herculis B				253.0	7.120		246.2		2.62	
β Persei A, B	var.	B 8	2.867	41.3	1.630	0.06	21.0	+ 3.4	0.021	Curtiss
β Persei A, C	—	—	1.90 Jahre	9.4	89.000	0.00	—	+ 4.1	0.060	Curtiss
β Aurigae A	2.1 ±	Ap	3.960	111.	6.059	0.00	—	− 19.8	2.4	Ludendorff
β Aurigae B				114.	6.193				2.3	
α Ursae min. A, B	2.1 ±	F 8	3.968	3.0	0.160	0.14	65.5	veränderlich	0.00001	Hellerich
α Virginis A	1.2 ±	B 2	4.014	126.1	6.930	0.10	328.0	+ 1.6	9.6	Baker
α Virginis B				207.8	11.400		148.0		5.8	
29 Canis maj.	4.9	Oe	4.393	218.4	13.035	0.16	37.6	− 12.1	4.58	Harper
o Persei A	3.9 ±	B 1	4.419	111.9	6.801	0.00	—	+ 18.5	5.43	Jordan
o Persei B				160.0	9.717				3.80	
δ Cephei	var.	G	5.366	19.7	1.271	0.48	85.4	− 16.8	0.0028	Moore
η Aquilae	var.	G	7.176	20.6	1.773	0.49	68.9	− 14 2	0.0043	Wright
η Orionis	3.4 ±	B 1	7.990	144 8	15.901	0.02	42.3	+ 35.5	2.51	Adams
ζ Geminorum	var.	G	10.154	13.2	1.798	0.22	333.0	+ 6.8	0.0023	Campbell
β Lyrae	var.	B 8 Bp	12.919	184.4	32.750	0.02	0 2	− 21.0	6.77	Curtiss
				75.0	13.300		180.2		16.62	
α Coronae bor.	2.3 ±	A	17.36	34.9	7.671	0 39	312.2	+ 0 4	0.060	Jordan
ζ Andromedae	4 3	K	17.767	25.7	6.272	0.04	182.2	− 29.8	0.0312	Cannon
ζ_1 Ursae maj. A	2.4 ±	Ap	20.532	134.5	32.700	0.51	101.4	− 12.6	1.66	Ludendorff,
ζ_1 Ursae maj. B					32 700		281.4		1.66	Hnatek
ε Ursae min.	4.4	G 5	39.482	32.0	17.346	0 01	359.5	− 11.4	0.13	Flaskett
β Coronae bor. A, B	3.7	Fp	40.9	3.1	1.600	0 4	240.0	− 21.3	0 0001	Cannon
β Coronae bor. A, C	—	—	490.8	2.4	16.200	0.00	—	—	0.0007	
α Andromedae	2.2	A	96.67	30.8	34.790	0.52	76.2	− 11.5	0.180	Baker
α Aurigae A	0.2 ±	G F 5?	104.035	25.8	36.847	0.02	117.3	+ 30.2	1.38	Goos, Reese
α Aurigae B				34 8	49.743		297.3		1.02	
β Arietis	2.7	A 5	107.0	32.6	22.880	0.88	19.7	− 0.6	0.042	Ludendorff
φ Persei	4.2 ±	Bp	126.5	26.9	42.298	0.43	347.3	+ 3.2	0.189	Cannon
β Herculis	2.8 (var.?)	K	410.575	12.8	60.280	0.55	24.6	− 25.5	0.052	Reese und Plummer
η Pegasi	3.1	G	818.0	14.2	157.800	0.16	5.6	+ 4.3	0.23	Crawford
ε Ursae maj.	1.7 ±	Ap	4.15 Jahre	3.5	69.360	0.31	55.8	− 12.9	0.0058	Ludendorff
γ Geminorum	1.9	A	5.95J.	6.1	174.720	0 30	16.3	− 12 3	0.045	Harper
ν Geminorum	4.1	B 5	9.6 J.	30.0	1417.000	0.20	285.	+ 38.4	9.25	Harper
ε Hydrae	3.7, 5.2	F 8	15.3 J.	8.4	493.000	0.65	90.0	+ 36.8	0.15	Aitken

g Ursae, nämlich von nur $3\frac{1}{4}$ Stunden, hat der δ Cephei-Veränderliche XX Cygni. Ist die Auffassung der Veränderlichen dieser Klasse als Doppelsterne zutreffend, so stellt dieser Wert bisher die untere Grenze der Umlaufszeiten dar.

Abnorm hohe Dichten von visuellen Doppelsternen.

Für Krüger 60 fanden Pavel und Bernewitz[89]) aus den Anschlüssen der beiden Komponenten an den nicht zum System gehörenden optischen Begleiter C das Massenverhältnis $m_1 : m_2 = 1.20$. Mit der von ihnen angenommenen Parallaxe 0.252″ ergibt sich $m_1 + m_2 = 0.476$ Sonnenmasse, folg-

lich $m_1 = 0.260$, $m_2 = 0.216$ Sonnenmasse. Damit ergibt sich für die schwächere Komponente eine unwahrscheinlich hohe Dichte. Die folgenden Fälle dieser Art sind einer noch nicht veröffentlichten Untersuchung von Bernewitz entnommen. Die kleinen Abweichungen der zugrunde gelegten Zahlen von den früheren sind hier belanglos.

Stern	p abs.	$m_1 + m_2$	m_1	m_2	M_1 ($p=0.1''$)	M_2 ($p=0.1''$)	D_1	D_2	D_m	Spektrum der beiden Komp.
o_2 Eridani BC.	0.194″	0.32	0.16	0.16	10.6^m	12.3^m	5.6×10^3	5.9×10^4	—	A, A
Sirius	0.376	3.4	2.4	1.0	1.3	11.3	0.22	8.8×10^4	—	A, A
Sirius	0.376	3.4	2.4	1.0	—	10.4	—	3.6	—	(Mb)
Procyon . . .	0.311	1.4	1.0	0.4	2.9	16.0	0.16	2.1×10^3	—	F 3, (Mc)
μ_1 Herculis BC.	0.103	1.08	—	—	10.1	10.6	—	—	2.5	Mb
Krüger 60 . .	0.260	0.44	0.24	0.20	11.3	13.0	3.1	18.9	—	Mb, (Mc)
85 Pegasi. . .	0.095	0.93	0.26	0.67	5.8	10.9	0.44	3.5	—	G 1, (Mc)

Es bedeutet: p abs. die absolute Parallaxe; $m_1 + m_2$, m_1, m_2 die Summe und die Einzelwerte der Massen der Komponenten in Einheiten der Sonnenmasse; M_1, M_2 die absoluten Sterngrößen für $p = 0.1''$ (absolute Helligkeit der Sonne $= 4.85^m$ angenommen), D_1, D_2, D_m die Einzelwerte und das Mittel der Dichtigkeiten der Komponenten in Einheiten der Dichte der Sonne. In der letzten Spalte sind die Spektren der Komponenten angegeben, soweit sie durch Beobachtung bestimmt werden konnten. Fehlt die Beobachtung des Spektrums, so ist die zur Erlangung einer plausibeln Dichte günstigste Annahme gemacht; die betreffenden Spektren sind eingeklammert. Bei Sirius ist die Rechnung für den Begleiter außer mit dem beobachteten Spektrum auch mit der Annahme Mb gemacht, um zu zeigen, daß erst mit dieser eine plausible Dichte zu erzielen ist. In den extremen Fällen müssen effektive Temperaturen von nur 2000° und darunter angenommen werden, damit man zu Dichten gelangt, die noch plausibel erscheinen.

Fälle plausibler Dichten.

Stern	$p_{abs.}$	M_1 ($p=0.1''$)	M_2 ($p=0.1''$)	D_1	D_2	D_m	Spektrum	Angenommene Massen
η Cassiopeiae	0.198″	5.2^m	8.9^m	0.59	1.18	—	F9, K4	0.6, 0,4
β 883	0.027	5.1	5.1	—	—	0.43	F9	1.3
α Gemin.	0.078	1.4	2.3	0.46	0.50	—	A, A	4.1, 1.4
ε Hydrae	0.025	0.5	3.8	0.003	—	—	F9, —	1.8, 1.6
Σ 3121	0.080	7.4	7.7	—	—	0.17	K3	0.51
ξ Ursae maj.	0.167	5.5	6.0	0.71	1.15	—	F9, G1	0.43, 0.52
OΣ 235	0.056	4.6	5.9	0.25	—	—	F5, —	0.52
γ Virginis	0.071	2.9	2.9	0.46	0.48	—	Fo, Fo	2.1, 2.1
42 Comae	0 078	4.7	4.7	—	—	0.51	F5	0.93
α Centauri	0.760	4.7	6.1	0.49	0.05	—	Go, K5	1.1, 0.9
ξ Bootis	0.230	6.6	8.6	0.37	0.56	—	G6, K3	0.21, 0.19
η Coronae	0.084	5.2	5.7	—	—	0.40	Go	0.69
ζ Herculis	0.119	3.4	6.9	0.06	—	—	G1, —	0.9, 0.4
Σ 2173	0.056	4.7	4.9	—	—	0.31	G5	3.2
70p Ophiuchi	0.196	5.7	7.4	0.16	0.17	—	Ko, K5	1.0, 0.6
β 648	0.100	5.2	8.7	0.53	—	—	F7, —	0.53
δ Equulei	0.071	4.4	4.9	—	—	1.02	F4	1.7
κ Pegasi	0.024	1.6	2.1	—	—	0.18	F2	10.3, 4.0

Für die übrigen Systeme mit hinreichend genau bekannter Bahn und Parallaxe ergaben sich im großen ganzen plausible Dichten, wie vorstehende Zusammenstellung zeigt.

Unter den angeführten Dichten ist auffallend die geringe Dichte des Begleiters von α Centauri, die der ganzen Sachlage gemäß etwa gleich der des Hauptsternes hätte erwartet werden sollen. Sie ist aber wahrscheinlich fehlerhaft wegen ungenauer Bestimmung des Spektraltypus des Begleiters, dessen Spektrum auf den Objektivprismenaufnahmen fast ganz vom Spektrum des Hauptsternes überlagert ist. Ferner erscheint die Dichte von ε Hydrae auffallend klein. Allerdings hat dieser Stern auch die größte absolute Helligkeit unter den betrachteten Paaren. Aus dem genannten vorhandenen Material mit Ausschluß von ε Hydrae, α_2 Centauri, 13 Ceti und den Fällen o_2 Eridani und Sirius erhält Bernewitz folgende Beziehung zwischen Dichte, absoluter Helligkeit und Spektraltypus:

Dichte, absolute Helligkeit und Spektraltypus.

Mittlere absolute Sterngröße	Dichte	Spektren von — bis	Zahl der Sterne
0.8m	0.08	A0 — F3	4
1.5	0.20	A0 — F2	6
2.6	0.24	A0 — G0	11
3.5	0.26	A2 — K2	8
4.6	0.45	F1 — G5	11
5.6	0.43	F7 — K0	12
6.2	0.47	F5 — K5	9
8.1	0.52	K3 — K5	4
10.7	2.8	Mb	2

Die Sterne gehören praktisch alle der Zwergserie an. Man erkennt eine ziemlich gleichmäßige Zunahme der Dichten mit abnehmender absoluter Helligkeit und ein Fortschreiten des durchschnittlichen Spektraltypus in derselben Richtung. Dies gilt bis zur absoluten Größe 9m oder 10m. Dann beginnt das Auftreten der abnormen Fälle. Die beiden Sterne der letzten Reihe sind μ_1 Herculis und Krüger 60. Sie gehören offenbar bereits zu den Sternen, die gemäß den im früheren entwickelten Anschauungen am wahren Ende der Entwicklungsreihe stehen. Für diese ist der Zusammenhang zwischen Spektraltypus und effektiver Temperatur bzw. Oberflächenhelligkeit anscheinend ein ganz anderer als für die übrigen Sterne.

Die Parallaxen der vorstehenden Tabellen entstammen teils unmittelbaren (trigonometrischen) Bestimmungen, teils sind sie durch Vergleichung der visuellen Bahnbewegung mit den Radialgeschwindigkeiten erhalten. Diese letztere Methode liefert recht genaue Werte. Für α Centauri z. B. ergibt sich auf diese Weise sehr nahe die gleiche Parallaxe wie auf dem direkten Wege. Die so erhaltenen Parallaxen sind die der Sterne ε Hydrae, δ Equulei und κ Pegasi.[90]) Die Parallaxe von β 883 ist die der Hyadengruppe, der der Stern angehört.

Ein Blick auf die Massen zeigt, daß beträchtlich von 1, der Sonnenmasse, verschiedene Werte sehr selten zu sein scheinen. Dies gilt nicht nur für die

Grenzen der Massen.

betrachteten Fälle, sondern allgemein, auch für die spektroskopischen Systeme, soweit die Massen zu ermitteln sind. Kein System ist bekannt, dessen Gesamtmasse kleiner als etwa 0.3 oder größer als etwa 50 Sonnenmassen ist. Die kleinste bisher bekannte Masse (etwa $^1/_7$ Sonnenmasse) hat der Begleiter von Krüger 60. Es scheint hierhin eine notwendige Existenzbedingung für selbstleuchtende und stabile Himmelskörper von der Art der Fixsterne angedeutet zu sein.[91]) Ordnet man weiter die Massen — bzw. die Massenfunktionen oder die $m \sin^3 i$ — der spektroskopischen Systeme nach dem Spektraltypus, so ergibt sich, wie Ludendorff[92]) gezeigt hat, unter Voraussetzung durchschnittlich gleicher Massenverhältnisse $m_2 : m_1$ in den Systemen und durchschnittlich gleicher Bahnneigungen i, daß die Gesamtmassen mit fortschreitendem Spektraltypus abnehmen. Sie sind in den Stufen B0—B5 durchschnittlich 1.7 mal so groß als in den Stufen B8—B9, 2.5 mal so groß als in der Klasse A und 4 mal so groß als in der Klasse F. Die Massen der wenigen Fälle vom Typus Oe—Oe5 scheinen noch größer zu sein als die der B-Sterne. Für die Klassen G, K und M ist das Beobachtungsmaterial noch zu spärlich. Bemerkenswert ist auch, daß mit den großen Massen (vom Spektraltypus B) besonders häufig das Auftreten der scharfen und schwach bewegten Kalziumlinie K verbunden ist, die, wie schon früher erwähnt, einer äußeren Atmosphäre der betreffenden Systeme zugeschrieben wird. Diese Fälle verhalten sich vielleicht qualitativ zu den übrigen B-Sternen wie die planetarischen Nebel zu den O-Sternen, die ja in spektraler Beziehung eng miteinander verknüpft sind. Möglicherweise deuten auch helle Linien bei den frühern Spektraltypen nach Ludendorff auf große Masse hin. Was den wirklichen Wert der durchschnittlichen Gesamtmasse der spektroskopischen Systeme anbetrifft, so wird man nicht sehr fehlgehen, wenn man ihn für die Systeme vom Typus A zu etwa 4 Sonnenmassen annimmt. Das Verhältnis der Massen der beiden Komponenten ist bei den spektroskopischen Systemen sehr gleichförmig. Fast ausnahmslos ist die hellere Komponente auch die massigere. Nach Ludendorff ist das Verhältnis der Masse der schwächeren zu der der helleren Komponente im Durchschnitt 0.72, nach Aitken[93]) 0.75. Es sind Andeutungen dafür vorhanden, daß dieses Verhältnis mit fortschreitendem Spektraltypus zunimmt.

Beziehung zwischen Masse und Spektraltypus.

Weitere Beziehungen.

Durchschnittlicher Wert der Massen.

Massenverhältnis der Komponenten.

Für 14 visuelle Doppelsternsysteme mit bekannter Parallaxe fand Aitken die Gesamtmasse zu durchschnittlich 1.76 Sonnenmassen. Nahe denselben Wert fanden Eddington, Innes und Steele.[94]) Auch in den visuellen Systemen scheint in der Regel die hellere Komponente die massigere zu sein, und das durchschnittliche Massenverhältnis scheint einen ähnlichen Wert zu haben wie bei den spektroskopischen Systemen.

Weitere statistische Betrachtungen über die Doppelsterne.

Zahlreiche statistische Untersuchungen sind über Beziehungen zwischen den Bahnelementen und den physischen Verhältnissen der Doppelsterne, besonders der spektroskopischen, angestellt worden.[95]) Danach nimmt bei den spektroskopischen Doppelsternen die Bahnexzentrizität mit der Periodenlänge durchschnittlich zu. Zwischen den spektroskopischen und visuellen Doppel-

sternen besteht bezüglich der Exzentrizität ein großer Unterschied. Bei den ersteren ist der Mittelwert der Exzentrizität etwa 0.2, bei den letzteren 0.5. Dies ist von Bedeutung für die Beurteilung des genetischen Zusammenhangs zwischen den sehr engen spektroskopischen und den visuellen Doppelsternen. Die Trennung nach dem Spektraltypus ergibt auch innerhalb jeder Spektralklasse eine Zunahme der Exzentrizität mit der Periodenlänge, außerdem ein allmähliches Seltenerwerden der Systeme von sehr kurzer Periode mit fortschreitendem Spektraltypus. Aus einer näheren Untersuchung von Jordan scheint hervorzugehen, daß die Zunahme der Exzentrizität mit der Periodenlänge innerhalb jeder Spektralklasse nicht gleichmäßig ist, daß vielmehr in jeder Klasse eine ziemlich scharfe Trennung besteht zwischen den Systemen mit kurzer Umlaufszeit und kleiner Exzentrizität und den Systemen mit größerer Umlaufszeit und großer Exzentrizität.

Bei allen diesen Untersuchungen müssen stets diejenigen Sterne mit periodisch veränderlicher Radialgeschwindigkeit, die zugleich veränderliche Helligkeit nach Art von δ Cephei oder ζ Geminorum haben, beiseite gelassen werden, da sie sich gänzlich verschieden von den übrigen spektroskopischen Doppelsternen verhalten. Diese Sterne werden später für sich betrachtet werden.

Mehrfach tritt in den vorstehend betrachteten Untersuchungen die Tendenz der Exzentrizitäten hervor, bei einer gewissen Periodenlänge ein Maximum zu erreichen, bei kleinerer und größerer Periodenlänge also durchschnittlich geringer zu sein. Dieser für die Theorie der Entwicklung eines Doppelsternsystems wichtige Umstand ist jedoch noch nicht genügend gesichert.

Die früher aus noch ziemlich spärlichem Material an spektroskopischen Bahnen gefolgerte ungleichmäßige Verteilung der Periastronlängen, mit auffallender Bevorzugung des ersten Quadranten (0^0—90^0), scheint sich mit der Vermehrung der Zahl der bekannten Bahnen nach und nach auszugleichen. Im wesentlichen unverändert bestehen geblieben ist sie nur für die Veränderlichen vom δ Cephei-Typus, für die aber nur wenig neues Material hinzugekommen ist.

Wesentlich anders verhalten sich die visuellen Systeme. Zunächst fehlen unter ihnen, soweit Systeme mit bekannter Umlaufszeit (P also im allgemeinen unter 200 Jahren) in Betracht kommen, die ganz frühen Spektralklassen O und B völlig, die ganz späten Klassen M und N fast völlig. Das Fehlen der Klassen O und B, die unter den spektroskopischen Doppelsternen relativ am häufigsten vertreten sind, und die Seltenheit der Klassen M und N ist wohl auf die sehr große Entfernung der Helium- und Wolf-Rayet-Sterne, der N-Sterne und eines Teiles der M-Sterne zurückzuführen, infolge derer die engen Systeme mit weniger als 200 Jahren Umlaufszeit visuell nicht mehr getrennt werden können. Weitaus am häufigsten unter den visuellen Systemen mit schneller Bahnbewegung ist die Klasse G vertreten, was der Tatsache entspricht, daß die Sterne dieser Klasse uns durchschnittlich am nächsten

sind, also, wenn sie Doppelsternsysteme sind, auch am leichtesten getrennt werden können. Die Exzentrizitäten nehmen auch bei den visuellen Systemen mit der Periodenlänge zu, aber weit schwächer, als dies bei den spektroskopischen Systemen der Fall ist. Aitken erhält aus dem bis Ende 1917 vorliegenden Material folgende Zusammenstellung:

	Durchschnittliche Periode	Durchschnittliche Exzentrizität	Zahl der Systeme
Spektroskopische Doppelsterne	2.75 Tage	0.047	46
	7.80 „	0.147	19
	23.00 „	0.324	25
	555 „	0.350	29
Visuelle Doppelsterne	31.3 Jahre	0.423	30
	74.4 „	0.514	20
	170 „	0.539	18

Eine weitere Zerlegung des Materials läßt auch hier wieder Maxima der Exzentrizität bei der Periodenlänge 20—50 Tage und 100—150 Jahre erkennen. Das letztere ist allerdings nur auf 6 Systeme begründet und daher vielleicht nur zufällig. Die Zunahme der Periodenlänge mit dem Fortschreiten in der Spektralreihe ergibt sich bei genauerer Prüfung ebenfalls anscheinend nicht als gleichmäßig. Es findet eine deutliche Trennung der spektroskopischen Systeme zwischen den Spektralklassen F und G statt in eine Gruppe B, A, F mit der durchschnittlichen Periode 22 Tage und der durchschnittlichen Exzentrizität 0.20, und in eine Gruppe G, K, M mit der durchschnittlichen Periode 240 Tage und der durchschnittlichen Exzentrizität 0.15. Innerhalb jeder Gruppe ist keine Zunahme der mittleren Periodenlänge mit fortschreitendem Spektraltypus zu erkennen. Bei den visuellen Systemen ist keine Abhängigkeit der Periode vom Spektraltypus zu erkennen, während die durchschnittliche Exzentrizität von Klasse A bis M langsam abnimmt von 0.53 bis 0.40. Ob letzteres ein Zufall ist oder eine kosmogonische Bedeutung hat, steht noch dahin.

Die Verteilung der Bahnneigungen ist ebenfalls häufig Gegenstand eingehender Untersuchungen gewesen.[96]) In erster Linie dachte man an eine Tendenz der Bahnebenen zum Parallelismus mit der Ebene der Milchstraße. Hierfür spricht z. B. die größere Häufigkeit der Bedeckungsveränderlichen und, wenn man sie ebenfalls als Doppelsterne auffaßt, der Veränderlichen vom δ Cephei-Typus in der Michstraße, als außerhalb derselben. Auch an andere Vorzugsebenen ist gedacht worden, z. B. von R. Prager und dem Verfasser für die dem System Ursa major angehörenden Doppelsterne an die Hauptebene des Systems. Im ganzen haben die allgemeinen Untersuchungen bisher zu widersprechenden Ergebnissen geführt, so daß die kosmogonisch sehr wichtige Frage noch als eine offene betrachtet werden muß.

Ausnahmestellung der Veränderlichen vom δ Cephei- und verwandten Typus.

Bei den vorstehenden Betrachtungen ist von den δ Cephei-, ζ Geminorum- und den RR Lyrae-Veränderlichen und Verwandten abgesehen worden, die sich in mehrfacher Beziehung so gänzlich anders verhalten als die gewöhn-

lichen spektroskopischen Doppelsterne, daß von namhaften Forschern ihr Doppelsterncharakter angezweifelt wird.[97]) Hier soll zunächst nur auf die Radialgeschwindigkeit dieser Sterne eingegangen werden. Folgende Tabelle enthält nach verschiedenen Quellen[98]) die Bahnelemente der genau untersuchten Sterne.

Stern	Spektrum	Periode (Tage)	Exzentrizität	Periastron	$a \sin i$ (km)	$f(m_1, m_2)$
β Cephei	B1	0.19	0.04	3°	45000	0.0001⊙
12 Lacertae	B2	0.19	0.0+	—	45000	0.0001
RR Lyrae	F	0.57	0.26	111	166600	0.00057
SZ Tauri	F8	3.15	0.24	77	460000	0.0004
RT Aurigae	G	3.73	0.37	95	856000	0.0018
SU Cygni	F5	3.84	0.21	346	1350000	0.0058
α Ursae min.	F8	3.97	0.14	66	160400	0.00001
T Vulpeculae	F	4.44	0.44	103	968000	0.0018
δ Cephei	G	5.37	0.36	83	1364000	0.0035
Y Sagittarii	G	5.77	0.20	37	1485000	0.0039
X Sagittarti	F8	7.01	0.40	94	1313000	0.0018
η Aquilae	G	7.18	0.47	66	1773000	0.0040
W Sagittarii	F5	7.60	0.36	43	1930000	0.0055
ζ Geminorum	G	10.15	0.20	338	1815500	0.0023
Y Ophiuchi	G	17.12	0.16	225	1798000	0.0008

Die beiden ersten Sterne zeigen Helligkeitsschwankungen ähnlich denen der übrigen, aber von viel geringerem Umfang; auch unterscheiden sie sich von ihnen wesentlich durch ihr Spektrum und die Kleinheit der Exzentrizität. In dieser Beziehung stehen sie den gewöhnlichen spektroskopischen Doppelsternen mit sehr kurzer Periode nahe. Die übrigen nun zeigen zunächst ein völlig anderes Verhalten der Exzentrizität zur Periodenlänge; sie ist durchschnittlich bedeutend größer als bei den gewöhnlichen spektroskopischen Doppelsternen derselben Periodenlänge. Beziehungen zwischen Exzentrizität und Periodenlänge, wie bei jenen, sind nicht angedeutet. Über etwaige Beziehungen zwischen Periodenlänge und Spektraltypus gibt das vorstehende Material keinen Aufschluß. Das Periastron ist weit davon entfernt, gleichmäßig über alle vier Quadranten verteilt zu sein. Die Werte $a \sin i$ sind alle auffallend klein, ebenso die Massenfunktionen, die von einer völlig anderen Größenordnung sind als der Durchschnitt für die übrigen spektroskopischen Doppelsterne. Der Wert der Massenfunktion $f(m_1, m_2) = \frac{m_2^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2}$ hängt von der Neigung i, der Gesamtmasse des Systems und dem Massenverhältnis $m_2 : m_1$ ab. Mit Rücksicht auf die mit der Bahnbewegung zusammenhängenden Helligkeitsschwankungen ist es sehr unwahrscheinlich, daß i für diese Systeme im Durchschnitt kleiner sein sollte als für die übrigen. Ebenso ist es unwahrscheinlich, daß die Gesamtmasse dieser Systeme abnorm klein sei. Dann bleibt, immer unter der Voraussetzung, daß die beobachteten Radialgeschwindigkeitsschwankungen als Bahnbewegungen interpretiert werden dürfen, nur die Möglichkeit eines Massenverhältnisses $m_2 : m_1$, das weit kleiner ist, als es durchschnittlich in den anderen Systemen gefunden worden ist.

Aus diesen Betrachtungen geht jedenfalls hervor, daß in den δ Cephei-Systemen besondere physische Bedingungen herrschen müssen, die ganz unähnlich denen der normalen Systeme sind.

Systeme mit mehr als zwei Komponenten: Polaris.

Besonderes Interesse beanspruchen noch die spektroskopischen und visuellen Systeme mit mehr als zwei Komponenten. Einige dieser Systeme mögen hier etwas näher betrachtet werden. Die Radialgeschwindigkeit des Polarsternes wurde 1899 von W. W. Campbell veränderlich gefunden in einer Periode von etwas weniger als vier Tagen. Die weitere Beobachtung durch Hartmann und auf der Licksternwarte ergab die genauere Periode 3.9682^d und die in der vorstehenden Tabelle sowie S. 421 angeführten Bahnelemente. Diese und das Spektrum erregten den Verdacht, daß der Stern ein δ Cephei-Veränderlicher sei, und Hertzsprung fand in der Tat 1911 eine Lichtschwankung von 0.17^m photographischer Amplitude. Während nun die zahlreichen fortgesetzten Beobachtungen keine Änderung der Bahnelemente verrieten, wurde die Schwerpunktsgeschwindigkeit des Systems allmählich abnehmend und dann wieder zunehmend gefunden; sie betrug 1897 — 17 km, 1900 nur noch — $11\frac{1}{2}$ km, 1910 wieder — 16 km, 1916 — 18 km. Es war also klar, daß in dem System des Polarsterns noch eine dritte, unsichtbare Komponente vorhanden ist, mit der sich das kurzperiodische System um einen gemeinsamen Schwerpunkt in einer stark elliptischen Bahn mit mindestens 20 Jahren Umlaufszeit bewegt. Die Länge der Umlaufszeit in der größeren Bahn erweckte die Hoffnung, die Bewegung in dieser Bahn auch in den visuellen Beobachtungen, sowohl den Rektaszensions- und Deklinationsbestimmungen wie den Mikrometermessungen des Polarsterns und seines bekannten visuellen Begleiters 9. Größe, nachzuweisen und damit eine genaue Bestimmung der Parallaxe des Sternes zu erhalten, die wegen seines δ Cephei-Charakters von besonderer Wichtigkeit ist. Der Versuch ist von Courvoisier gemacht worden, jedoch unter der von den Spektroskopikern anfangs gemachten irrigen Annahme einer 11.9 jährigen Umlaufszeit. Zweifellos wird aber der Versuch in einigen Jahren, wenn ein voller Umlauf beobachtet und damit die Richtigkeit der Interpretation der Schwankung der Schwerpunktsgeschwindigkeit sichergestellt sein wird, besseren Erfolg haben.

Algol.

Der auch als zuerst entdeckter Bedeckungsveränderlicher bekannte spektroskopische Doppelstern Algol zeigte in seiner, natürlich mit der Umlaufszeit in der Bahn übereinstimmenden Lichtwechselperiode von rund 2.87 Tagen beträchtliche langsame Schwankungen von kompliziertem Charakter, die seit Argelanders Zeiten Gegenstand zahlreicher Untersuchungen geworden sind. Nach einer Untersuchung Chandlers scheint auch die Eigenbewegung von Algol langsamen Schwankungen unterworfen zu sein. Die spektroskopische Duplizität wurde bereits 1889 von Vogel entdeckt, und seit dieser Zeit liegen eine Reihe genauer Bahnbestimmungen des Systems vor. Auch hier ergab sich eine veränderliche Schwerpunktsgeschwindigkeit, auf die zuerst Belopolsky, 1906, aufmerksam gemacht hat. Schlesinger fand die Periode der Schwankung der Schwerpunktsgeschwindigkeit zu 1.874 Jahren und die

Schwankung zu 18 km. Ihr entspricht eine nahezu kreisförmige Bahn, die das kurzperiodische System mit einer dritten Komponente um den gemeinsamen Schwerpunkt beschreibt. Die Existenz der dritten Komponente wird, wie Schlesinger gezeigt hat, dadurch bestätigt, daß die infolge der Bewegung des engen Systems um den Schwerpunkt des weiteren Systems zu erwartende Lichtgleichung in dem Lichtwechsel tatsächlich vorhanden ist. Die Lichtwechselperiode indessen zeigt außer der 1.9-jährigen Schwankung noch längere, die teils vielleicht auf weitere Komponenten in dem System, teils vielleicht auf eine Drehung der großen Achse der kurzperiodischen (elliptischen) Bahn hindeuten. Eine eingehendere Untersuchung der verwickelten Verhältnisse des Systems durch Hellerich läßt erkennen, daß wir noch weit entfernt von einer klaren Einsicht in dieselben sind.

λ Tauri.

Fast noch merkwürdiger scheinen nach den Untersuchungen Schlesingers die Verhältnisse in dem System eines anderen Bedeckungsveränderlichen, λ Tauri, zu liegen, dessen Lichtwechsel- und spektroskopische Umlaufsperiode rund 3.95 Tage beträgt. Hier ist über der kurzperiodischen Bahnbewegung noch eine längere von nur 34.6 Tagen Periode gelagert, deren Amplitude K gleich 10.4 km ist. Dies wird durch die älteren Beobachtungen, insbesondere diejenigen von Hartmann, die v. Aretin bearbeitet hat, bestätigt. Das Ergebnis der Schlesingerschen Untersuchung ist somit außer Zweifel. Das System λ Tauri besteht demnach, soweit bisher unsere Kenntnis von ihm reicht, aus drei Komponenten, von denen zwei in einer engen, schwach elliptischen Bahn mit 3.95 Tagen Umlaufszeit umeinander laufen, während dieses enge System mit einer dritten Komponente ein größeres System mit 34.6 Tagen Umlaufszeit bildet. Die Amplitude K des engen Systems ist 56 km. Infolge der Bedeckungen, die in dem engen System stattfinden, treten kurz vor und nach dem Hauptminimum der Helligkeit (der Bedeckung der helleren Komponente durch die schwächere) in den Radialgeschwindigkeiten Abweichungen von der berechneten Geschwindigkeitskurve auf, die erkennen lassen, daß die Rotation der hellen Komponente — und wohl auch der schwächeren — in der gleichen Zeit und in demselben Sinne erfolgt wie die Bahnbewegung. Die Möglichkeit dieser Feststellung wird sofort klar, wenn man bedenkt, daß während der Bedeckung nur ein Teil der Scheibe der bedeckten Komponente uns ihr Licht zusenden kann. Die dritte Komponente ist zu schwach, um sichtbare Linien im Gesamtspektrum des Sterns zu erzeugen. Weitere Überlegungen und Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen ergeben, daß die Masse der helleren Komponente 2.5, der zweiten Komponente (in dem viertägigen System) 1.0, der dritten 0.4 Sonnenmassen beträgt. Die mittleren Entfernungen der drei Komponenten vom Schwerpunkt des engen Systems betragen 3.2, 8.0 und 50.0 Millionen km. Die Masse der hellen Komponente überwiegt so stark, daß man das System auch so beschreiben kann: λ Tauri besteht aus einer hellen, massigen Komponente mit zwei schwächer leuchtenden Satelliten wesentlich geringerer Masse.

Auch unter den visuellen Systemen mit mehr als zwei Komponenten sind solche, deren Bewegungen bereits genaueren Untersuchungen zugänglich geworden sind. Am längsten bekannt ist das vierfache System ζ Cancri und das dreifache System ε Hydrae, die Seeliger eingehend untersucht hat. Das

ζ Cancri. System ζ Cancri besteht aus zwei hellen bereits von W. Herschel entdeckten Komponenten, die in 60 Jahren um ihren gemeinsamen Schwerpunkt in einer elliptischen Bahn sich bewegen. Die große Halbachse dieser Bahn beträgt 0.86″. Das Massenverhältnis der beiden nahe gleich hellen Komponenten ist wenig von 1 verschieden. Um dieses enge System läuft eine dritte (von Tobias Mayer 1756 entdeckte) Komponente in einem bisher nahezu konstanten Abstande von $5\frac{1}{2}$″ mit einer noch unbekannten, jedenfalls mehrere Jahrhunderte betragenden Umlaufszeit. Diese dritte Komponente zeigt nun ihrerseits wiederum periodische Abweichungen von ihrer mittleren Bewegung, die das Vorhandensein eines nahen, unsichtbaren Begleiters verraten, mit dem sie ein zweites enges System bildet. Seeliger fand die Umlaufszeit in diesem System gleich 17.6 Jahren und die Bahn nahezu kreisförmig, indessen ist die Exzentrizität in solchen schwierigen Fällen stets sehr unsicher zu bestimmen. Die Distanz der beiden Komponenten liegt sehr wahrscheinlich unter 1″.

ε Hydrae. Auch in dem System ε Hydrae fällt die große Verschiedenheit der Dimensionen des engen und des weiteren Systems auf. Hier besteht das von Schiaparelli entdeckte, aber bereits von O. Struve vermutete engere System aus zwei Komponenten 4. und 5. Größe, die in einer stark elliptischen Bahn von nur $\frac{1}{4}$″ mittlerer Distanz in 15.3 Jahren umeinander laufen. Die von W. Struve entdeckte dritte Komponente hat von diesem engen Paar eine Entfernung von $3\frac{1}{3}$″, und ihre Umlaufszeit beträgt sicherlich mehrere Jahrhunderte. Das Massenverhältnis in dem engen System ist gleich 0.9.

Große Verschiedenheit der Dimensionen der Partialsysteme in mehrfachen Systemen.

Bemerkenswert ist in diesen, wie in manchen anderen mehrfachen Systemen die große Verschiedenheit der Dimensionen der Partialsysteme, gleichsam als wenn mehrfache Systeme, in denen die Distanzen und Massen der Komponenten von gleicher Größenordnung sind, keinen Bestand haben könnten oder aus irgendeiner genetischen Ursache nicht möglich oder wahrscheinlich wären. Nun sind allerdings in den letzten Jahren auch solche Systeme bekannt geworden, in denen die Distanzen nur wenig verschieden sind, aber bevor die Bewegungen in diesen Systemen genauer untersucht sind, müssen weitere Betrachtungen über diese kosmogonisch wichtige Frage verschoben werden.

70 Ophiuchi. Ein drittes mehrfaches System der betrachteten Art, 70 Ophiuchi, ist in jüngster Zeit von Pavel untersucht worden. Es besteht aus drei Komponenten, von denen zwei, von der Helligkeit 4^m und 6^m, umeinander eine stark elliptische Bahn von 87.7 Jahren Umlaufszeit mit 4.5″ mittlerer Distanz beschreiben, während die dritte, unsichtbare, mit der 4^m-Komponente ein engeres System mit vorläufig kreisförmig angenommener Bahn bildet, dessen Periode $6\frac{1}{2}$ Jahre beträgt bei 0.7″ Abstand der hellen Komponente vom Schwerpunkt des engen Systems. Da die Parallaxe von 70 Ophiuchi bekannt ist — Pavel nimmt

0.225 (absolut) an —, so ergeben sich die großen Halbachsen der Bahnen zu rund 3000 bzw. 460 Millionen km. Die Massen sind 0.65, 0.37 und 0.03 Sonnenmassen. Die Massen der beiden hellen Komponenten sind etwas kleiner als die S. 422 angeführten, da Pavel seiner Berechnung eine etwas größere Parallaxe als dort zugrunde legt.

ι Cassiopeiae.

Interessante Verhältnisse scheinen auch in dem System ι Cassiopeiae vorzuliegen, in welchem ein Stern 4. Größe mit zwei Begleitern 7. und 8. Größe in 2″ bzw. 7½″ Distanz sichtbar sind. Die auf den Hauptstern bezogenen Örter der beiden Begleiter zeigen parallel verlaufende Störungen ihrer sehr langsamen mittleren Bewegung, die es wahrscheinlich machen, daß der Hauptstern selbst noch einen sehr nahen unsichtbaren Begleiter von mehreren Jahrzehnten Umlaufszeit hat.

ξ Ursae majoris

Der bekannte Doppelstern ξ Ursae majoris besteht zunächst aus zwei nahe gleich hellen Komponenten mit 60-jähriger Umlaufszeit. Bei der Bearbeitung der Beobachtungen fand Nörlund in der relativen Bewegung der beiden Sterne eine Störung von 1.8 Jahren Periode. Der Hauptstern war bereits früher von Wright spektroskopisch doppelt erkannt worden, so daß die Vermutung nahe lag, daß hiermit die Störung zusammenhänge. Dies ist in der Tat der Fall, denn die Schwankungen der Radialgeschwindigkeit sind mit der 1.8-jährigen Periode im Einklang. Später hat Hertzsprung die Störung auf photographischem Wege eingehend untersucht und völlig sicher bestätigt gefunden. Unter Vernachlässigung der Exzentrizität ergab sich der Radius der 1.8-jährigen Bahn zu 0.05″ und ihre Neigung so nahe gleich 90°, daß die Möglichkeit von Bedeckungen vorliegt, die bisher jedoch noch nicht beobachtet worden sind. Interessant ist, daß wegen der beträchtlichen Eigenbewegung von ξ Ursae majoris, der auch der Sonne ziemlich nahe steht, die Bedeckungen von der Sonne aus gesehen nur einen verhältnismäßig kurzen Zeitraum lang stattfinden können; Hertzsprung schätzt unter gewissen Voraussetzungen über die Dichte der Komponenten diesen Zeitraum zu 2—3 Jahrtausenden. Ob er schon abgelaufen ist oder noch bevorsteht, oder ob wir uns gerade in demselben befinden, müssen die weiteren mikrometrischen und die photometrischen Beobachtungen ergeben. Mit der Parallaxe 0.155″ fand Hertzsprung die Massen der drei Komponenten in der Reihenfolge der Helligkeiten zu 0.43, 0.60 und 0.16 Sonnenmassen.

κ Pegasi.

Komplizierter ist das von Henroteau untersuchte System κ Pegasi. Es besteht zunächst aus zwei visuellen Komponenten, die das von Burnham entdeckte bekannte enge kurzperiodische System mit 11.4-jähriger Umlaufszeit bilden. Diese beiden Komponenten haben nahe die gleiche Helligkeit 5^m. Eine derselben wurde von Campbell 1900 spektroskopisch doppelt gefunden. Nach den Untersuchungen Henroteaus beträgt die Periode des spektroskopischen Systems 5.97 Tage, die Exzentrizität 0.03; nur eine Komponente ist im Spektrum sichtbar. Die Massen sind schätzungsweise 10.3 Sonnenmassen für das spektroskopische System und 4.0 Sonnenmassen für die zweite visuelle Komponente. Die große Halbachse des visuellen Systems beträgt

1836 Mill. km und, falls die Bahnebenen des visuellen und spektroskopischen Systems zusammenfallen, was natürlich nicht notwendig ist, die große Halbachse des spektroskopischen Systems 6.7 Mill. km. Die Massen der einzelnen Komponenten des letzteren Systems sind 6.6 und 3.7 Sonnenmassen, wobei die helle Komponente die größere Masse hat. Die große Halbachse der spektroskopischen Bahn scheint sich in der Periode des visuellen Systems zu drehen.[99])

α Geminorum.

Visuelle Systeme, in denen beide Komponenten als enge spektroskopische Systeme erkannt worden sind, gibt es ebenfalls mehrere; die bekanntesten Fälle sind α Geminorum und ζ Ursae majoris. Die visuellen Komponenten des ersteren bilden den bekannten schönen Doppelstern, dessen Umlaufszeit Doberck zu rund $3\frac{1}{2}$ Jahrhunderten findet. Die schwächere Komponente ist ein spektroskopischer Doppelstern mit 2.9-tägiger, die hellere mit 9.2-tägiger Periode. Die visuellen Komponenten des zweiten Systems, ζ Ursae majoris, haben bisher keine relative Bewegung gezeigt. Die hellere Komponente ist der erste auf spektroskopischem Wege entdeckte Doppelstern (Pickering 1889) — der zweite war Algol (Vogel 1889). Zufällig ist Mizar auch der erste bekannte visuelle Doppelstern (Riccioli 1650). Die Periode des spektroskopischen Systems beträgt $20\frac{1}{2}$ Tage. Die schwächere visuelle Komponente ist ebenfalls ein spektroskopischer Doppelstern, über den aber noch nichts Näheres bekannt ist. Der in 11′ Distanz entfernte Alkor (g Ursae), der mit ζ gemeinsame Eigenbewegung hat und zum System Ursa major gehört, ist nach Frost spektroskopischer Doppelstern mit einer der kürzesten der bisher bekannten Perioden, die nur 3.7 Stunden (0.155 Tage) beträgt. Über diese Systeme folgen nähere Angaben bei den veränderlichen Sternen, ebenso über die merkwürdigen Systeme β Lyrae, φ Persei, 12 Canum venaticorum, β Cephei, 12 Lacertae, Boss 46, auf die daher hier nicht weiter eingegangen werden soll.

ζ Ursae majoris.

Sichtbarkeit beider Komponenten im Spektrum.

Einer kurzen Betrachtung bedürfen noch diejenigen Fälle von spektroskopischen und visuellen Doppelsternen, in denen das Spektrum beider Komponenten bekannt ist. Bezüglich der spektroskopischen Systeme, deren Umlaufszeiten meistens nur nach Tagen oder Monaten rechnen, so daß die Abstände der Komponenten gering sind, sollte man aus kosmogonischen Gründen von vornherein bei nahe gleicher Helligkeit der Komponenten auch nahe gleiche Spektren erwarten. Dies ist in der Tat bei allen oder fast allen derartigen Systemen der Fall. Die Linien der schwächeren Komponente sind im gemeinsamen Spektrum nur dann sichtbar, wenn der Helligkeitsunterschied unter etwa zwei Größenklassen bleibt. Über die Fälle mit sehr verschiedener Helligkeit der Komponenten ist daher nichts bekannt. In einigen Fällen scheint eine Abweichung von der Regel vorzuliegen. So sind im Spektrum von o^1 Cygni die Linien zweier Komponenten vom Spektraltypus K und A sichtbar. Das Spektrum von ζ Aurigae setzt sich aus einer K- und einer B 5- oder B 8-Komponente zusammen. Noch verschiedenere Merkmale zeigt das Spektrum von δ Sagittae; hier sind die Linien

des Typus Ma mit denen des Typus A vereinigt. Das Spektrum von γ Persei besteht aus einer G- und einer A 2-Komponente, das Spektrum von β Capricorni ebenfalls aus einer G- und einer A 2-Komponente, das Spektrum von α Equulei aus einer F 8- und einer A 5- oder F 0-Komponente, das Spektrum von o Andromedae aus einer A 0- und einer B 5-Komponente, das Spektrum von o Leonis aus einer F 5- und einer A 5-Komponente usw. Soweit diese Systeme genauer untersucht sind, hat sich — mit alleiniger Ausnahme von o Leonis, dessen Periode 14½ Tage beträgt — langsame Bahnbewegung ergeben. Für β Capricorni ist eine Umlaufszeit von 3.8 Jahren bestimmt worden; ebenso beläuft sie sich für o^1 Cygni, ζ Aurigae, δ Sagittae, γ Persei, α Equulei und manche andere der hier nicht angeführten Fälle zweifellos auf Jahre oder Jahrzehnte. Im allgemeinen scheint der Unterschied der Spektren um so geringer zu sein, je kürzer die Umlaufszeit ist. Demgemäß treten starke spektrale Unterschiede der Komponenten bei den visuellen Doppelsternen viel häufiger auf. Unter 45 Paaren (Distanz kleiner als 31″) mit einem Helligkeitsunterschied von weniger als 1^m sind 6 mit einem spektralen Unterschied von mehr als einer Klasse und 39 von weniger als einer Klasse. Unter 29 Paaren mit mehr als 1^m Helligkeitsunterschied sind 19 mit einem spektralen Unterschied von mehr als einer Klasse und 10 von weniger als einer Klasse. Die weitaus meisten der untersuchten Paare sind Systeme mit sehr langsamer Bahnbewegung. Also je größer Distanz (Umlaufszeit) und Helligkeitsunterschied der Komponenten, desto verschiedener im Durchschnitt ihr Spektraltypus. Daß dieses Verhalten von besonderer Bedeutung für die Art der Entstehung und die Weiterentwicklung der Doppelsternsysteme sein muß, ist ohne weiteres einleuchtend.[100])

Der Wert gleichzeitiger visueller und spektroskopischer Beobachtung eines Doppelsterns für die genaue Ermittlung der Parallaxe ist bereits erwähnt worden. In letzter Zeit ist es gelungen, zwei Systeme, die zunächst nur spektroskopisch erkannt waren, auch visuell zu trennen. Der eine Fall betrifft α Aurigae. Der Versuch, das spektroskopische System dieses Sternes visuell zu trennen, ist bald nach der Entdeckung der spektroskopischen Duplizität gemacht worden. Die in Greenwich mit einem 28-zölligen Refraktor erhaltenen Anzeichen des Begleiters konnten jedoch anderweitig nicht bestätigt werden. Neuerdings scheint nun nach einem vorliegenden sehr kurzen Bericht die Trennung mit dem 100-zölligen Reflektor des Mount Wilson mittels Interferenzmethoden gelungen zu sein. Die Distanz der Komponenten wurde am 30. Dezember 1919 zu 0.042″ und der Positionswinkel zu 148° oder 328° bestimmt. Weitere Beobachtungen ergaben die Bahnneigung und damit die Massen der Komponenten; zahlenmäßige Angaben über diese Konstanten sowie über die sich ergebende Parallaxe fehlen in dem Bericht. Der zweite Fall bedarf noch weiterer Bestätigung. Der Heliumstern ν Geminorum ist nach Harper ein spektroskopischer Doppelstern mit der ungewöhnlich langen Periode von 9.6 Jahren. Die Exzentrizität der Bahn beträgt 0.20. Da die Amplitude der Radialgeschwindigkeit (30 km) recht beträchtlich für einen

Visuelle Auflösung spektroskopischer Doppelsterne.

solchen Fall ist, ferner beide Komponenten im Spektrum sichtbar sind, so ist die Möglichkeit einer visuellen Trennung dieses Systems vorhanden, deren Gelingen von besonderem Interesse sein mußte. Beobachtungen am 65 cm-Refraktor der Babelsberger Sternwarte durch Bernewitz und Pavel ergaben eine leichte Verlängerung des Sternes zur Zeit der aus der spektroskopischen Bahn geschlossenen größten Distanz der Komponenten. Die Distanz war schätzungsweise 0.16″. Falls dieselbe genau der großen Halbachse der projizierten spektroskopischen Bahn (1417 Mill. km) entspräche, würde die Parallaxe des Sternes von der Größenordnung 0.01″ sein. Die absolute Sterngröße (Parallaxe 0.1″) von ν Geminorum, dessen Spektrum B 5 ist, würde damit sich zu etwa -1^m ergeben; das System ν Geminorum wäre also sechs Größenklassen heller als die Sonne.

Es bleibt noch übrig, über die spektroskopischen Ergebnisse zu berichten, die an einzelnen spektroskopischen Systemen und an anscheinend einfachen Sternen mit besonderen physikalischen Bedingungen erhalten worden sind. Diese Ergebnisse stehen jedoch mit anderen Fragen, die im folgenden behandelt werden, in engem Zusammenhang und sollen daher mit diesen zusammen betrachtet werden.

Sterne mit veränderlicher Helligkeit.

h) Veränderliche Sterne. Bereits unter den spektroskopischen Doppelsternen waren mehrfach Fälle zu erwähnen, in denen mit der Schwankung der Radialgeschwindigkeit auch eine Schwankung der Helligkeit vorhanden ist. Dies sind nicht die einzigen Fälle veränderlicher Helligkeit unter den Fixsternen; sehr häufig wird auch Veränderlichkeit der Helligkeit bemerkt, ohne daß gleichzeitige Veränderungen der Radialgeschwindigkeit festzustellen sind. Wenigstens ist dies bisher in vielen Fällen noch nicht gelungen, wenn es auch wahrscheinlich ist, daß mit jeder Helligkeitsschwankung Veränderungen im Spektrum, sei es bezüglich der Lage und der Beschaffenheit der Linien, sei es bezüglich der Helligkeitsverteilung des kontinuierlichen Grundes, einhergehen.

Das Gebiet der veränderlichen Sterne[101]) hat seit der Entdeckung des ersten Veränderlichen, Mira Ceti, durch Fabricius im Jahre 1596 besonders in neuerer Zeit eine gewaltige Ausdehnung erlangt, und schon lange entstand das Bedürfnis, die Übersicht über die große Mannigfaltigkeit der Erscheinungen durch Klassifizierung derselben zu erleichtern. Eine rationelle Einteilung der Veränderlichen kann ohne hinreichende Einsicht in die physikalischen Verhältnisse derselben, die teilweise auch heute noch nicht erlangt ist, nicht ausgeführt werden. Die älteren Einteilungen sind aus dem Grunde fast alle rein formale, die sich nur auf die äußeren Merkmale des Lichtwechsels stützen. Sie können hier füglich übergangen werden. Heute ist man wenigstens so weit, daß man, wenn auch die wahren Ursachen der Helligkeitsschwankungen mehrerer Klassen von Veränderlichen noch nicht näher feststehen, doch wenigstens die physische Zusammengehörigkeit in den meisten Fällen beurteilen kann. Von diesem Standpunkte aus ist die folgende Einteilung zu bewerten, in der die Klassen teilweise nach ausgeprägten Vertretern benannt sind.

Einteilung der veränderlichen Sterne.

I. Klasse: Neue Sterne.
II. Klasse: R Coronae borealis.
III. Klasse: U Geminorum.
IV. Klasse: μ Cephei, η Geminorum, R Scuti.
V. Klasse: Miratypus.
VI. Klasse: R Sagittae.
VII. Klasse: δ Cephei, ζ Geminorum, RR Lyrae (δ Cephei-, ζ Geminorum-, Antalgoltypus).
VIII. Klasse: Bedeckungsveränderliche (Algol- und β Lyrae-Typus).

Aus methodischen Gründen werden im folgenden die Veränderlichen mit sehr kleinen Helligkeitsschwankungen ($<0.2^m$) besonders betrachtet werden, obwohl sich die bisher bekannten Fälle zwanglos in den vorstehenden Klassen unterbringen lassen.

Die Neuen Sterne.

I. Neue Sterne. Die Neuen Sterne (Novae) sind in photometrischer Beziehung dadurch gekennzeichnet, daß ihre Strahlung, soweit unsere heutige Kenntnis reicht, eine einmalige Störung erleidet und dann wieder zu mehr oder weniger ruhigem Verhalten zurückkehrt. Die Störung äußert sich gewöhnlich in einem einzigen plötzlichen, meist ganz gewaltigen Anschwellen der Strahlung mit darauf folgender langsamer Abnahme. Es sind allerdings auch Fälle mehrmaligen Aufloderns der Helligkeit bekannt; jedoch scheint es sich hierbei stets um Erscheinungen zu handeln, die miteinander im Zusammenhang stehen. Die als typisch zu betrachtenden Erscheinungen lassen sich am besten an bestimmten Beispielen erläutern, für die die am genauesten erforschten hellsten Neuen Sterne der letzten beiden Jahrzehnte, wie die Nova Persei und die Nova Aquilae, gewählt werden mögen. Die Nova Aquilae war vor ihrem Auflodern ein schwaches Sternchen 10. bis 11. Größe, dessen Helligkeit, wie die nachträgliche Untersuchung der zahlreichen älteren photographischen Aufnahmen der Himmelsgegend (seit 1888) von M. Wolf in Heidelberg und der Harvard-Sternwarte ergab, deutlichen, anscheinend unregelmäßigen Schwankungen im Betrage bis zu etwa einer Größenklasse unterworfen war. Auch andere Neue Sterne haben nachgewiesenermaßen schon vor dem Auflodern als leuchtende Sterne am Himmel gestanden, wenngleich von ihnen keine genügend zahlreichen Aufnahmen vor dem Lichtausbruch vorhanden sind, aus denen etwas über das frühere Verhalten der Helligkeit geschlossen werden könnte, so daß die Frage vorläufig offen bleibt, ob alle Neuen Sterne bereits vor dem Aufleuchten Veränderliche waren, und welcher Klasse von Veränderlichen sie etwa angehörten. Gewisse, später zu erörternde Beobachtungen der letzten Zeit liefern Anzeichen dafür, daß die Novae in ihrem ursprünglichen Zustande Veränderliche der V. oder IV. Klasse gewesen sein könnten. Der ursprüngliche Zustand der Nova Aquilae dauerte bis etwa zum 5. Juni 1918; an diesem Tage hat Wolf noch die Himmelsgegend aufgenommen. Der Stern hatte noch die gewöhnliche Helligkeit (10.5^m). Auf einer Aufnahme der Harvard-Sternwarte vom 7. Juni ist er bereits 6. Größe, und am darauffolgenden Abend, als seine Auffindung

Beschreibung des Lichtwechsels. Nova Aquillae (1918).

an zahlreichen Orten stattfand, war die Helligkeit fast zu der von α Aquilae (1. Größe) angewachsen. Sie nahm bis zum folgenden Abend noch weiter zu und erreichte ein Maximum von -0.5^m oder -0.6^m. Nur Sirius und Canopus übertrafen die Nova Aquilae zu dieser Zeit an Helligkeit. Das Verhältnis der größten zur kleinsten Helligkeit ist also ein enormes, es beträgt etwa 25000 : 1. In anderen Fällen ist es aber zweifellos noch weit größer gewesen. Am 10. Juni hatte die Helligkeit bereits merklich abgenommen, zwischen dem 12. und 13. Juni erreichte sie in der Abnahme wieder die 1. Größe, am 17. die 2., am 22. die 3. Größe. Ende Juni beginnen dann periodische Schwankungen der Helligkeit von einem Charakter, wie er bei den Veränderlichen vom δ Cephei-Typus in der Regel beobachtet wird, bei gleichzeitiger starker Verlangsamung der allgemeinen Helligkeitsabnahme. Diese mehr oder weniger periodischen Schwankungen während der Helligkeitsabnahme, obwohl nicht an allen Neuen Sternen beobachtet, scheinen eine für diese Sterne charakteristische Erscheinung zu sein. Sie waren bei der Nova Persei von 1901, bei der Nova Aurigae von 1891, bei der Nova Geminorum von 1912 u. a. vorhanden. Allmählich werden sie kleiner und unregelmäßiger und verschwinden schließlich fast ganz, höchstens bleiben noch gelegentliche langsame Fluktuationen übrig. Die allgemeine Helligkeitsabnahme schreitet inzwischen fort, kann aber, wie bei der Nova Persei und der Nova Aquilae, noch jahrelang andauern. Die Periode der kurzen Schwankungen während der Zeit ihrer größten Regelmäßigkeit betrug bei der Nova Aquilae rund 12 Tage, bei der Nova Persei rund $4^1/_2$ Tage; ihr Umfang erreichte bei ersterer 0.7^m, bei letzterer mehr als 1^m. Bei der Nova Persei zeigte die Periode der Schwankungen, bevor diese ganz unregelmäßig wurden, eine deutliche Zunahme von einigen Zehnteln eines Tages. Bemerkenswert ist, daß man, von dem Maximum in der ersten ausgeprägten Schwankung aus mit der Anfangsperiode rückwärts rechnend, bei beiden Sternen auf das Hauptmaximum der Helligkeit trifft. Die allgemeine Helligkeitsabnahme wird schließlich unmerklich klein. Ob die endliche Helligkeit im allgemeinen wieder der ursprünglichen gleich wird, steht nicht fest. Bei einer Nova wenigstens scheint dies nicht der Fall zu sein; die Nova T Coronae von 1866 ist lange vor ihrer Entdeckung als Stern 9.5-ter Größe in der Bonner Durchmusterung katalogisiert worden und hat heute etwa die 15. Größe. Wenn der Stern also nicht etwa bereits zur Zeit der Bonner Beobachtung in einer Revolutionsepoche sich befunden hat, so zeigt dieser Fall, daß die Folgen der Umwälzungen sich noch auf lange Zeit erstrecken.

Abweichende Fälle: P Cygni.

Von dem geschilderten typischen Verlauf weichen einige Neue Sterne mehr oder weniger entschieden ab. Die Nova P Cygni von 1600 war zur Zeit ihrer Entdeckung am 18. August 1600 3. Größe. Nach den dürftigen Nachrichten war der Stern 1602, wo ihn Kepler beobachtete, ebenso hell, 1621 war er dem unbewaffneten Auge unsichtbar, 1655 wieder 3. Größe. Dann verschwand er wieder um 1660, war jedoch 1665 nach Hevel nochmals sichtbar, aber schwächer als früher. Seit 1677 ist die Helligkeit unverändert

5. Größe. Auch die Nova Vulpeculae von 1670 und die Nova Aurigae von 1891 zeigten ein mehrmaliges Aufleuchten innerhalb weniger Jahre bzw. Monate, nur sind beide Sterne jetzt sehr schwach. Sehr eigentümlich hat sich der seinem Spektrum nach auch den Neuen Sternen zuzurechnende Stern η Argus (Carinae) verhalten. Im Jahre 1677 war er nach Halley 4. Größe, dann wuchs er zur 2. Größe an, die er nach den gelegentlichen Beobachtungen 1685—1689 und 1751 besaß. Burchell sah ihn 1827 als Stern 1. Größe, J. Herschel 1834—1837 1.—2. Größe. Gegen Ende 1837 stieg die Helligkeit auf etwa 0.0^m und nahm dann bis 1839 langsam auf 1.0^m ab. So blieb er bis 1843, um dann schnell wieder bis auf etwa -0.5^m anzuwachsen. Nun begann die dauernde Abnahme; 1867 war die Helligkeit 6^m, und seit 1870 ist sie mit geringen Schwankungen dauernd zwischen 7^m und 8^m. η Argus.

Die größte scheinbare Helligkeit erreichten die Nova Cassiopeiae von 1572 mit -4^m, die Nova Serpentarii von 1604 mit -2^m, die Nova Persei von 1901 mit 0.0^m und die Nova Aquilae von 1918 mit -0.5^m. Die hellsten Novae.

Charakteristisch ist auch der Farbenwechsel, den die meisten Novae im Verlauf ihrer Entwicklung darbieten. Die Farbe ist zuerst weiß, wird dann zu Beginn der Abnahme gelblich, später eigentümlich rötlich und schließlich wieder weißlich. Die Nova Aquilae war 1919 ausgesprochen grün. Während der periodischen Helligkeitsschwankungen zeigte die Nova Persei auch einen parallel zu diesen verlaufenden periodischen Farbenwechsel; die Farbe war in den Helligkeitsmaxima gelblichweiß, in den Minima rötlich. Die rötliche Farbe der Neuen Sterne ist übrigens gänzlich verschieden von der gelbroten Färbung gewöhnlicher stark gefärbter Sterne; sie ist ausgesprochener rot mit einem Stich ins Bläuliche, da die rote Färbung nicht auf einer entsprechenden Helligkeitsverteilung im kontinuierlichen Spektrum, sondern auf der zeitweilig überaus großen Intensität der hellen roten Wasserstofflinie H_α beruht. Farbenwechsel der Neuen Sterne.

Die spektralen Erscheinungen, die die Neuen Sterne darbieten, sind außerordentlich merkwürdig und auf den ersten Blick sehr abweichend von denen der meisten übrigen Sterne. Über das Spektrum vor dem Aufleuchten und im ersten Stadium der Helligkeitszunahme ist erklärlicherweise bisher nichts bekannt. Die frühesten Daten betreffen die Zeit kurz vor der Erreichung des Helligkeitsmaximums. Zu dieser Zeit (einen Tag vor dem Maximum) bestand das sichtbare Gebiet des Spektrums der Nova Aquilae aus einem hellen kontinuierlichen Grunde mit intensivem Blau und Violett, der von kräftigen Absorptionsstreifen durchzogen war. Sicher identifizierbar waren die Linien des Wasserstoffs, H_α, H_β, H_γ; ferner war eine Linie nahe am Ort der Heliumlinie D_3 vorhanden. Weitere Linien im Rot und Grün. Bei ungefähr 5000 AE lag ein breites dunkles Band, und zwischen diesem und H_β waren noch zwei Linien zu sehen. Die meisten der dunkeln Linien, insbesondere die Wasserstofflinien, hatten in einem Abstand von etwa 100 AE nach dem roten Ende des Spektrums hin einen hellen, schmalen und scharfen Begleiter, der von der dunkeln Komponente weit getrennt war. Diese hellen Das Spektrum der Neuen Sterne. Erstes Stadium.

Komponenten waren nur wenig aus ihrer normalen Lage verschoben, während die dunkeln Linien stark nach dem Violett verschoben waren. Es mag hier gleich eingeschaltet werden, daß die Wasserstoffabsorptionen und die meisten anderen Absorptionen in den Spektren der Novae stets sehr stark nach Violett verschoben sind, niemals nach der entgegengesetzten Richtung. Diese Violettverschiebung ist demnach charakteristisch für die Neuen Sterne. Die Verschiebung, als Dopplereffekt aufgefaßt, entsprach bei der Nova Aquilae am 8. Juni einer Annäherung der absorbierenden Gase von rund 4600 km in der Sekunde.

Zweites Stadium. Das nächste, wesentlich verschiedene Stadium der Entwicklung ist das des Helligkeitsmaximums, das die Nova Aquilae am 9. Juni erreichte. Zu dieser Zeit hatte das kontinuierliche Spektrum seine größte Helligkeit erlangt; während kurzer Zeit zeigten sich die Emissionslinien im photographischen Spektralgebiete gar nicht, im visuellen nur noch sehr schwach. Dafür hatten die Absorptionen im sichtbaren Spektralgebiet gegen den vorhergehenden Abend besonders an Zahl stark zugenommen. Nach den spärlichen photographischen Belegen, die für die beiden ersten Tage vorliegen, traten zwischen dem 8., 9. und 10. Juni starke Änderungen im ultravioletten Spektralgebiet ein. Am 8. Juni bestand das violette Absorptionsspektrum hauptsächlich aus den Linien H und K des Kalziums, der Linie 4481 des Magnesiums und den Wasserstofflinien (charakteristisches Funkenspektrum der betreffenden Metalle). Der Charakter des Absorptionsspektrums im gewöhnlichen photographischen Gebiet, etwa zwischen H_β und H_ε, entsprach infolge des Vorherrschens der Funkenlinien der Metalle zur Zeit des Maximums und noch geraume Zeit nach demselben sehr nahe dem Spektrum von α Cygni, das der Mauryschen Nebenserie *c* angehört, im übrigen aber mit A 2 bezeichnet wird. Es unterscheidet sich von der normalen Serie der A-Sterne, wie früher bemerkt, durch das Vorherrschen der Funkenlinien der Metalle vor den Bogenlinien. Dies deutet also auf sehr hohe Temperatur der Nova oder allgemeiner auf sehr starke Anregung zur Zeit des Helligkeitsmaximums hin. Merkwürdigerweise entstanden aber im Ultravioletten nach Frost und Parkhurst[102]) bereits in den ersten Tagen ausgesprochene Sonnenlinien (Bogenlinien), die im Spektrum der Sonne oder des Arktur kräftig, dagegen in dem von α Cygni nicht auffallend sind.

Vom 10. Juni ab sind dann sämtliche Regungen der Nova Aquilae durch zahlreiche spektrographische Aufnahmen belegt. Diese Belege in Verbindung mit den eingehenden Untersuchungen an den vorangehenden helleren Novae, insbesondere der Nova Geminorum von 1912 und der Nova Persei von 1901, haben das Verständnis der Phänomene, die die Neuen Sterne darbieten, außerordentlich gefördert. Die Ähnlichkeit des Absorptionsspektrums im frühen Stadium der Entwicklung mit dem von α Cygni war auch bereits bei den letztgenannten Novae aufgefallen, es waren aber noch starke Komplikationen vorhanden, die erst jetzt ihre Aufklärung gefunden haben. Man hat erkannt, daß die spektralen Erscheinungen der frühesten Stadien voll-

kommen erklärt werden können, wenn man annimmt, daß das Absorptionsspektrum der Novae aus mehreren verschieden stark verschobenen Komponenten vom α Cygni-Charakter besteht, und daß das Emissionsbänderspektrum einem ebensolchen, aber nur schwach verschobenen Spektrum entspricht. Letzteres bezieht sich aber nur auf die Mitte der sehr breiten und meist sehr komplexen Emissionsbänder, deren Ränder beträchtlichen positiven und negativen Verschiebungen entsprechen. Während man früher die starken Verschiebungen und Verbreiterungen der Linien in den Novaspektren zum größten Teil auf Druckeffekte zurückzuführen geneigt war, herrscht heute die Ansicht vor, daß sie im wesentlichen wirkliche Dopplereffekte sind. Folgende Gründe sprechen vor allem für diese Auffassung: die Unabhängigkeit der Verschiebungen und Verbreiterungen von der Natur der beteiligten Gase und die Proportionalität derselben mit der Wellenlänge, was beides mit der Auffassung als Druckeffekte nicht vereinbar ist.

Eine übersichtliche Darstellung der spektralen Erscheinungen der Nova Aquilae ist von Lunt[103]) gegeben worden. Wir folgen zunächst im wesentlichen dieser Darstellung. In den Tagen vom 10. bis 12. Juni bestand das Spektrum des Titan in der Nova ganz aus den Funkenlinien, deren 38 gezählt wurden. Die Linien des Titan waren im Gegensatz zu einigen Funkenlinien des Eisens, den Linien H und K des Kalziums und den Wasserstofflinien alle einfach vorhanden. Wie bei den früheren Novae waren nahe dem normalen Ort der Linien H und K (und D) feine Absorptionslinien, deren Radialgeschwindigkeit gegen das Fixsternsystem nahe Null war, die also offenbar von ruhendem Kalziumdampf in der Umgebung der Nova oder zwischen dieser und der Sonne herrührten. Die Absorptionslinien des Wasserstoffs, des Eisens (Funkenlinien) usw. bestanden, wie bemerkt, aus mehreren Komponenten, und zwar Juni 10—12 aus zwei, deren Violettverschiebungen mit der Zeit verschieden stark zunahmen. Es betrugen die Verschiebungen, in Radialgeschwindigkeiten umgesetzt, für die Serie der weniger brechbaren Komponenten: Juni 10 — 1407 km, Juni 11 — 1478 km, Juni 12 — 1513 km und für die Serie der brechbareren Komponenten bzw. — 2166, — 2176 und — 2194 km. Die feinen schwach verschobenen Absorptionslinien hatten Verschiebungen von bzw. + 3.3, + 2.5 und + 8 km. Dies deutet also auf drei getrennte Massen absorbierenden Dampfes hin. Mit dieser Auffassung sind fast alle Linien des Novaspektrums identifizierbar. Folgende Elemente sind insbesondere nachgewiesen: Titan, Eisen, Chrom, Scandium, Strontium, Kalzium, Magnesium, Wasserstoff, Helium. Möglicherweise ist auch Vanadium vorhanden. Das Auftreten von Heliumlinien in einem Absorptionsspektrum vom Typus A(*c*) ist normal, indem in der Mauryschen Serie *c* die Funkenlinien des Heliums auch noch bei A-Sternen wie α Cygni gefunden werden. Die dunkeln Wasserstoff- und Kalziumlinien waren sehr breit, die übrigen Metallinien verhältnismäßig scharf und schmal. Das Aussehen der verbreiterten Linien wechselte von Tag zu Tag, $H_\delta^{(3)}$ z. B. war einen Tag an der violetten Seite scharf begrenzt und an der roten verwaschen; am folgenden

Tage war das Umgekehrte der Fall. Die Emissionsbänder waren, nachdem sie aus dem kontinuierlichen Spektrum sich abzuheben anfingen, was seit dem 10. Juni mit zunehmender Stärke der Fall war, sehr breit und nach dem Violetten scheinbar von der ersten Komponente der entsprechenden Absorptionslinien begrenzt. Die Vermutung, daß die Verbreiterung der Linien von schneller Rotation der Nova herrühren könnte, wird durch die Intensitätsverteilung in den Bändern nicht bestätigt. Ungeachtet mancher Ungleichförmigkeiten ist die Intensität von der Mitte der Bänder nach dem Rande hin doch zu wenig abfallend.

Die weiteren Entwicklungsphasen.

Nach dem 12. Juni beginnen dann stärkere Veränderungen sowohl im Absorptions- wie im Emissionsspektrum der Nova. Die hellen Bänder treten infolge schneller Abnahme der Intensität des kontinuierlichen Spektrums mehr und mehr hervor und bereiten so den späteren Übergang in das Nebelspektrum vor. Jedoch verschwindet zunächst das Funken-Absorptionsspektrum noch nicht ganz. Nach Newall[104]) waren am 13. Juni in den Emissionsbändern H_β, H_γ, H_δ des Wasserstoffs je vier Maxima vorhanden, von denen die äußeren Verschiebungen von -1300 und $+1200$ km aufwiesen, während die beiden inneren sehr eng beieinanderlagen und später als ein einziges mit verhältnismäßig geringer Verschiebung erschienen. Die Absorptionslinien des Wasserstoffs bestanden zeitweise aus drei Komponenten mit Verschiebungen von -2800, -2300 und -1700 km. Werden dementsprechend drei übereinandergelagerte α Cygni-Spektren mit diesen Verschiebungen angenommen, so ergibt sich zwanglose Interpretation der übrigen Absorptionslinien. Die mehrfachen Sätze von Absorptionslinien mit wachsender Verschiebung zum Violett sind in der Weise zu erklären, daß mehrfache Ausbrüche der Gase aus dem Stern stattfanden oder mehrere Ausbruchsstellen vorhanden waren, und daß die Gase sich infolge des Strahlungsdruckes mit wachsender Geschwindigkeit vom Stern entfernten, in den Raum zerstreuten und verschwanden. Damit steht auch im Einklang, daß die verschobenen Linien um so verwaschener und breiter waren, je stärker nach dem Violett sie verschoben waren. In den Emissionsbändern waren außer den drei oder vier Helligkeitsmaxima und den dazwischenliegenden Minima zeitweise auch dunkle Linien sichtbar; sie rührten von Absorptionen der in der Novaatmosphäre vorhandenen Metalldämpfe her, die sich auf die breiten Emissionsbänder projizierten. Am 16. Juni sind die Absorptionslinien der brechbareren Serie verschwunden, nur noch eine Funkenlinie des Eisens und die Komponenten H_δ, H_γ, H_β, H_α sind sichtbar, die alle zu dem am wenigsten verschobenen Satz von Linien gehören. Anfang Juli sind die Absorptionslinien überhaupt fast ganz verschwunden. Die zunehmende Geschwindigkeit der absorbierenden Gase ergibt sich besonders deutlich aus folgenden Beobachtungen von Evershed[105]), die sich auf die Verschiebungen der beiden Komponenten der Linie H_δ beziehen: 12. Juni -1586 und -2193 km, 13. Juni -1630 und -2478 km, 16. Juni -1689 km (die zweite Serie nicht mehr erkennbar), 18. Juni -1749 km; dann bleibt die Verschiebung

nahezu konstant bis zum Verschwinden der Linien. Die hellen Bänder bleiben ungleichmäßig hell; sie entsprechen teils den Wasserstofflinien, teils den Funkenlinien der Metalle und des Heliums in dem nicht verschobenen α Cygni-Spektrum.

Erstes Auftreten von Nebellinien.

Als erstes spezifisches Anzeichen des Nebelstadiums der Nova ist vielleicht das Auftreten des Emissionsbandes bei λ 4640 anzusehen, das auf Mitte Juni zu setzen ist. Die bekannten Hauptnebellinien λλ 5007, 4959 erscheinen jedoch erst gegen Ende Juni, die dritte, λ 4363, erst am 10. Juli, und bleiben dann bis zum Verschwinden des Sternes in den Sonnenstrahlen im Spätherbst. Die Breite der Emissionsbänder war, wie bemerkt, nahe proportional der Wellenlänge: die Nebelbänder 5006.9 und 4959.1 bzw. 55.9 und 56 A, H_β 54 A, das Novaband 4641.1 51 A, das Nebelband 4363 49 A, H_γ 46 A, H_δ 44 A. Die Radialgeschwindigkeit aus den hellen breiten Bändern, der Mitte derselben entsprechend, wird von verschiedenen Beobachtern etwas verschieden gefunden, Lunt findet im Mittel — 51.6 km, Newall — 110 km, Evershed — 78 km usf. Indessen sind diese Werte wegen der großen Breite der Emissionsbänder und ihrer komplexen Beschaffenheit nur unsicher. Die Verschiebungen der schmalen und scharfen Absorptionslinien H, K, 4227, D werden von den Beobachtern sowohl für die Nova Aquilae wie für die Nova Persei übereinstimmend zu nahe Null (relativ zum Fixsternsystem) gefunden. Die verschobenen Kalziumlinien verhalten sich wie die übrigen verschobenen Metallinien. Die Radialgeschwindigkeit, wie sie aus den schwach bewegten Absorptionslinien folgt, wird von manchen Beobachtern als die eigentliche Radialgeschwindigkeit der Novae betrachtet; von anderen wird die Berechtigung dieser Auffassung bestritten. Für dieselbe spricht, daß auch die sphärischen Eigenbewegungen der Novae stets sehr klein gefunden werden, ferner, daß die Radialgeschwindigkeiten so ausgesprochen galaktischer Objekte, wie die Neuen Sterne es sind, meistens klein sind.

Die Radialgeschwindigkeit aus den wenig verschobenen Absorptionslinien.

Noch einige Bemerkungen über das Spektrum der Nova Geminorum von 1912, das in mancher Beziehung weniger kompliziert war als das der Nova Aquilae, mögen hier folgen, soweit sie wesentliche Abweichungen von diesem betreffen.[106]) Das Absorptionsspektrum im ersten Stadium dieser weit schwächer als die Nova Aquilae bleibenden Nova entsprach einer Zwischenstufe zwischen den beiden *c*-Sternen α Cygni und γ Cygni (Spektrum F 8). Die Verschiebungen der Absorptionslinien waren geringer als bei der Nova Aquilae; auch hier erschienen nach und nach mehrere Serien von Linien. Zwei Wochen nach dem Aufleuchten waren zwei wohldefinierte verschobene Absorptionsspektren von verschiedenem Typus vorhanden: eins vom Typus A mit den Linien des H, Fe, Ti, He, Ca und — 800 km Verschiebung; eins vom Typus B (γ Orionis) mit den für ihn charakteristischen Linien des H, He, O, C, N und — 1450 km Verschiebung. Die Emissionsbänder entsprachen am meisten dem Typus A und waren ebenfalls komplex. Außer den verschobenen Absorptionslinien waren auch unverschobene Linien, H, K und andere, vorhanden, die ein unverschobenes α Cygni-Spek-

Das Spektrum der Nova Geminorum 1912.

trum bildeten und nach der Ansicht einiger Beobachter vielleicht von den zuerst ausgeschleuderten und allmählich zur Ruhe gekommenen Gasen herrührten. Das B-Spektrum überwog allmählich das A-Spektrum und verdrängte es schließlich; gleichzeitig ging das zuerst dem Typus A entsprechende Emissionsbänderspektrum in ein ebensolches vom Typus B über, ohne große Änderung der Struktur der Bänder. Ganz ähnlich verlief die weitere Entwicklung des Spektrums der Nova Aquilae.

Periodische Veränderungen.

Ehe das nun folgende Nebelfleckstadium beschrieben wird, müssen noch die ihm vorangehenden periodischen Veränderungen des Spektrums im Zusammenhang mit den kurzperiodischen Helligkeitsschwankungen betrachtet werden. Die periodischen Helligkeitsschwankungen sind am zwanglosesten als ein Rotationseffekt zu deuten; die Periode der Schwankungen ist dann die Rotationsperiode des Sternes. Der Rotationseffekt ist natürlich auch bei der Erörterung der spektralen Erscheinungen überhaupt zu berücksichtigen. Sind die Gasausbrüche auf einzelne Stellen der Sternoberfläche beschränkt, so wird er anfangen sich deutlicher bemerkbar zu machen, sobald die zuerst den Stern ganz einhüllenden Gasmassen sich infolge ihrer Zerstreuung in den Raum zu lichten beginnen. Es treten dann Schwankungen der Helligkeit und des Spektrums auf, die anfangs recht beträchtlich sein werden und ziemlich regelmäßig periodisch verlaufen, später aber mit der allmählichen Wiederkehr ruhiger und gleichmäßiger Zustände auf der Oberfläche des Sternes kleiner und unregelmäßiger werden und schließlich ganz abklingen. Bei der Nova Geminorum waren die Veränderungen des Spektrums mit den periodischen Helligkeitsschwankungen in der Weise verknüpft, daß die meisten kräftigen Absorptionslinien in den Maxima der Helligkeit dem B-Spektrum entsprachen, während in den Minima der Helligkeit das spätere dauernde Emissionsbänderspektrum antizipiert wurde. Es war also offenbar im wesentlichen ein Wechsel der Helligkeit des kontinuierlichen Spektrums vorhanden. Dasselbe gilt für die Nova Persei und die Nova Aquilae.

Das Gasnebelstadium.

Nach dem Stadium der kurzen Helligkeitsschwankungen tritt dann eine vorläufige Konsolidierung der Verhältnisse ein. Das Spektrum geht in ein typisches Gasnebelspektrum über, das fast nur aus hellen Bändern besteht. Für das Auge überwiegt weitaus die Helligkeit des grünen Nebelbandes 5007, wodurch der Stern eine eigentümliche grüne Färbung erhält, wie sie unter den Fixsternen sonst nicht beobachtet wird. Gleichzeitig ändert sich auch der unmittelbare Anblick des Sternes im Fernrohr. Er nimmt mehr und mehr ein verwaschenes Aussehen an, sein vorher durchaus unmerklich kleiner sternartiger Durchmesser wächst, und schließlich bietet sich eine kleine unscharfe planetarische Scheibe mit einer zentralen Verdichtung dar. Die Nova ist auch äußerlich ein planetarischer Nebel geworden. Der Durchmesser der Nova Aquilae betrug nach Barnard im Oktober 1918 0.65″, im November 1.2″, im Dezember 1.8″ und im Juni 1920 fast 4″. Am 65 cm-Refraktor der Babelsberger Sternwarte bot sich um die letztere Zeit die

Nova als ein intensiv grünes verwaschenes rundes Nebelfleckchen mit einer zentralen Verdichtung dar, das durch die mangelhafte chromatische Vereinigung der Strahlen nicht erklärt werden kann. Es liegt sehr nahe, zur Erklärung an die aus den Eruptionen stammenden, durch den Strahlungsdruck von dem Stern weggetriebenen leuchtenden Dämpfe zu denken.

Das Spektrum im Nebelstadium.

Über das das anfängliche Emissions- und Absorptionsspektrum allmählich ganz verdrängende Nebelspektrum — die letzten Spuren des A- und B-Absorptionsspektrums konnten bis Ende Oktober 1918 verfolgt werden[107]) — ist folgendes zu sagen. Bei der Nova Aquilae wurden die Nebelbänder 5007 und 4959 im August 1918 ungleichmäßig hell, es bildeten sich schmalere und hellere Mittelpartien in ihnen aus, deren Verschiebungen positiv (+ 12 km) waren. Eine ähnliche Erscheinung, die auf getrennte Massen emittierenden Gases hindeutet, wurden auch bei der Nova Geminorum beobachtet. Das dritte Nebelband 4363.25 (in den Nebelflecken 4363.37 gefunden) begann am 10. Juli sichtbar zu werden, erreichte dann bald die Intensität von H_γ und hatte dieses Band im April 1919 ganz verdrängt. Der Wechsel der relativen Helligkeit der beiden Nebellinien 5007 und 4363, dem ein analoges Verhalten dieser Linien in den Gasnebeln gegenübersteht, ist nach Nicholson[108]) kein hinreichender Grund, sie verschiedenen Gasen zuzuschreiben. Von den übrigen Bändern interessieren besonders diejenigen bei λ 4640, λ 4686 und λ 4097. Das erste Band ist charakteristisch für das Novaspektrum in einer bestimmten Entwicklungsstufe. Es tritt auch in den Wolf-Rayet-Sternen auf, wo Campbell es in zwei (4636 und 4651) zerlegte. Im Spektraltypus B o ist nahe seinem Ort eine starke Absorptionslinie vorhanden. Im Spektrum der Nova Aquilae waren an der Stelle drei Bänder vorhanden, bei 4634, 4650 und ein breites, die beiden überlagerndes mit der Mitte bei 4641. Die Identifizierung dieser Bänder ist noch nicht sicher; in Betracht kommen Stickstoff und Kohlenstoff. Das zweite der oben genannten Bänder, 4686, entspricht sehr wahrscheinlich der früher für die erste Linie der ersten Hauptserie des Wasserstoffs gehaltenen Linie 4686, die in den Wolf-Rayet-Spektren ebenfalls als helles Band bei 4688 auftritt. Sie wird, wie schon bemerkt, jetzt für eine Linie hoher Temperatur des Heliums gehalten. Das Emissionsband 4097, das wegen der Nachbarschaft des Emissionsbandes H_δ nicht leicht nachweisbar ist, scheint Ende Juni sicher vorhanden gewesen zu sein. Es entspricht einer Linie hoher Temperatur des Stickstoffs und ist in den Spektren vom Typus Oe durch eine kräftige Absorptionslinie vertreten. Andere Stickstoffbänder bei 3995, 4447, 5667, 5680, 5942 wurden zeitweise vermutet. Stickstoff wurde auch bei anderen Neuen Sternen als wahrscheinlich vorhanden gefunden.

Das Nebelspektrum der Novae und die echten Gasnebel.

Zwischen dem Nebelspektrum einer Nova und dem Spektrum eines echten planetarischen Nebels besteht bei aller Ähnlichkeit doch ein wesentlicher Unterschied, auf den bereits Huggins 1893 und später wieder Hartmann aufmerksam gemacht haben. Die Emissionen der Nebel sind schmal und scharf, die der Novae dagegen stets stark verbreitert. An eine völlige

Umwandlung der Novae in echte planetarische Nebel konnte daher schon aus diesem Grunde im Ernst nicht gedacht werden. Neuere Forschungsergebnisse haben denn auch die Berechtigung dieses Zweifels bestätigt.

Bis zum Jahre 1907 war das Nebelstadium die letzte bekannte Entwicklungsstufe der Novae, und man hatte sich schon an den Gedanken gewöhnt, daß mit diesem Stadium ein vorläufiger Abschluß der rapiden Entwicklungen erreicht sei und die weiteren Entwicklungsprozesse sich in ähnlich langen Zeiträumen abspielen, wie wir sie für die gewöhnliche Sternentwicklung annehmen müssen. Zwar kennt man eine Nova (P Cygni), die bereits im Jahre 1600 erschien und heute noch als ein Stern 5. Größe am Himmel steht, also bequem genauer spektroskopischer Untersuchung zugänglich ist. Und diese Nova hat heute ein Spektrum vom Typus B mit dunkeln Linien und hellen Bändern.[109]) Es hat also den Anschein, als ob der Stern in den seit seinem Aufleuchten verflossenen drei Jahrhunderten, falls er sich wie eine typische Nova verhalten hat, vom planetarischen Nebel durch den Typus O hindurch bis zum Typus B weiterentwickelt habe. Aber den dürftigen Nachrichten aus dem 17. Jahrhundert nach zu urteilen hat P Cygni bezüglich seiner Helligkeit ein so abweichendes Verhalten gehabt, daß es nicht sicher ist, ob er wirklich eine Nova im gewöhnlichen Sinne gewesen ist. Es war daher eine große Überraschung, als Hartmann 1908 anzeigte, daß das Spektrum der Nova Persei von 1901 sich mittlerweile in ein Typus O-Spektrum verwandelt habe. Die Helligkeit der Nova war 1907 zur Größe 11.4 herabgesunken. Das Spektrum wurde mit einem lichtstarken Quarzspektrographen[110]) besonderer Konstruktion am 80 cm-Refraktor der Potsdamer Sternwarte in $8^1/_4$-stündiger Belichtung erhalten. Es stellte sich als ein schwaches kontinuierliches Spektrum mit den breiten charakteristischen Emissionsbändern der Wolf-Rayet-Sterne, insbesondere des Wolf-Rayet-Sternes BD $+ 35^0 4001$, dar. Es wurden festgestellt die Linien λ 4688, H_β, H_γ, H_δ, λ 4618, λ 3890. Letztere Linie fehlt in dem O-Stern. Dagegen fehlten in dem Novaspektrum die früher so intensiven Hauptnebellinien 5007 und 4959, die auch in den Wolf-Rayet-Sternen fehlen. Diese Beobachtung ist dann 1913 und 1914 mit dem 60-zölligen Mount Wilson-Reflektor von Adams und Pease außer an der Nova Persei auch an der Nova Aurigae von 1891, deren Helligkeit 14. Größe war, bestätigt worden.[111]) Das Spektrum der Nova Persei war danach in den letzten sechs Jahren unverändert geblieben. Die Spektren der Nova Lacertae von 1910 und der Nova Geminorum von 1912 zeigten 1913 bzw. 1914 noch die Hauptnebellinien 5007 und 4959 in großer Intensität; dagegen fehlte die dritte, bei 4363, im Spektrum der Nova Lacertae, oder war jedenfalls äußerst schwach. Das kontinuierliche Spektrum war am hellsten in den beiden älteren Novae. Gleichzeitig scheint das Aussehen dieser Novae wieder sternartig geworden zu sein.

Ursprung der Hauptnebellinien.

Das merkwürdige Verhalten der Hauptnebellinien gab zu der Vermutung Anlaß, daß dieselben entgegen der auch theoretisch begründeten Ansicht[108]) nicht so sehr einem besonderen, nur in einem gewissen Ent-

wicklungsstadium der Novae vorhandenen bzw. emittierenden unbekannten Gase, als vielmehr den physikalischen Bedingungen, unter denen die bekannten Gase leuchten, ihren Ursprung verdanken.

Die Nebel in der Umgebung der Nova Persei.

Die vorhin erwähnte Nebelhülle, die sich im Laufe der späteren Entwicklung um die Neuen Sterne bildet, darf nicht verwechselt werden mit den merkwürdigen nebelartigen Erscheinungen, die in der Umgebung der Nova Persei zuerst von Wolf am 23. August 1901, dann von Ritchey, Perrine und anderen photographisch festgestellt wurden.[112]) Diese Nebel stellten sich dar als ein zartes, fein gegliedertes, aus mehreren unregelmäßigen elliptischen Ringen bestehendes Gebilde, das die Nova ringsherum umgab und anfangs einen Durchmesser von 25′ besaß. Es ergab sich alsbald, daß dieses Gebilde sich scheinbar in rapider Ausdehnung, oder Bewegung nach auswärts, befand. Diese Bewegung war in bezug auf die Nova im großen ganzen radial gerichtet, wenn auch im einzelnen beträchtliche Abweichungen von dieser Richtung auftraten. Gewisse Teile des Nebels wurden dabei schnell schwächer, andere Teile dagegen nahmen mit der Zeit an Helligkeit zu. Der Nebel wurde nachträglich auch auf einer Aufnahme der Licksternwarte vom 29. März aufgefunden. Die Bewegungen waren von der Ordnung 1′ im Monat. Diese ungeheure Geschwindigkeit neben den übrigen Erscheinungen führte alsbald zu der von Kapteyn, Seeliger und Wilson aufgestellten Erklärung, daß dieses Nebelgebilde keinen unmittelbaren Zusammenhang mit den von dem Ausbruch der Nova ausgeschleuderten Dämpfen hatte, sondern schon vorher dort vorhandene Materie darstellte, die nach und nach von dem Licht der Nova erreicht wurde und in dem reflektierten Licht dann aufleuchtete. Die Erscheinungen in dem Nebel um die Nova Persei sind physikalischen und mathematischen Betrachtungen von Kapteyn, Bell und Seeliger[113]) unterzogen worden. Heute ist die Nebelmaterie in der Umgebung der Nova wieder unsichtbar. Untersuchungen des Nebels auf polarisiertes Licht führten zu keinem greifbaren Ergebnis. Sein Spektrum wurde leider erst im Herbst 1902 untersucht, als der Nebel bereits sehr schwach geworden war. Das Spektrum der hellsten Stelle des Nebels war kein Gasspektrum, sondern schien dem der Nova in den ersten Tagen ihres Aufleuchtens ähnlich zu sein.[114])

Effektive Temperatur und Farbenindex der Novae.

Helligkeitsmessungen im Spektrum der Neuen Sterne und Farbenindexbestimmungen derselben zum Zweck der Ermittelung der effektiven Temperatur liegen nur wenige vor. Es sollen nur kurz die Ergebnisse zweier Beobachtungsreihen, die die Nova Aquilae von 1918 betreffen, betrachtet werden.[115]) Wilsing findet aus der Energieverteilung im kontinuierlichen Spektrum am 10. Juni 1918 die absolute effektive Temperatur der Nova zu 9000°; dieselbe nahm dann ab und erreichte am 13. Juni den Wert 5700°. Dann erfolgte wieder eine Zunahme auf 10000° am 19. Juni. Am 30. Juni wurde 7100°, am 4. Juli 11100° gefunden. Die beiden letzten Werte fallen nahe mit dem ersten Minimum bzw. Maximum der Helligkeit in der kurzperiodischen Schwankung zusammen. Man erkennt aus der Vergleichung

vorstehender Zahlen mit den effektiven Temperaturen und Spektralklassen S. 413, wie nahe der Spektralcharakter der Nova, wie er aus den Linien sich ergibt, mit der Helligkeitsverteilung im kontinuierlichen Spektrum übereinstimmt. Messungen der Flächenhelligkeit des Emissionsbandes H_α ergaben, daß diese im Juni weit langsamer abnahm als die Helligkeit des kontinuierlichen Spektrums bei λ 6040. Von der Wasserstoffstrahlung abgesehen und nach Berücksichtigung der fortschreitenden Helligkeitsänderung entsprachen die kurzperiodischen Helligkeitsschwankungen den gefundenen Temperaturschwankungen unter Voraussetzung schwarzer Strahlung. Die auf lichtelektrischem Wege mittels Gelbfilter bestimmten Farbenindices entsprachen folgenden Spektralstufen: 9. Juni 1918 F o, 10. Juni B 8, 11. Juni Oe 5—B o, 12. Juni B 2, 18. Juni B 2, 30. Juni A 3 usf. Zu Anfang der kurzperiodischen Schwankungen entsprachen den Maxima frühere, den Minima spätere Spektralstufen. Mitte August begann das Äquivalentspektrum, das allmählich bis F 3 fortgeschritten war, wieder ein früheres zu werden, und am 30. August war es wieder bei B 2 angelangt. Dann aber schritt es wieder nach F. Der Zusammenhang mit den kurzperiodischen Helligkeitsschwankungen hörte gleichzeitig auf.

R Coronae borealis.

II. R Coronae borealis.[116]) Die Neuen Sterne zeigen nicht nur zu den planetarischen Nebeln und den Wolf-Rayet-Sternen deutliche Beziehungen, wie im vorigen gezeigt wurde, sondern es gehen noch nicht ganz bloßgelegte Fäden von ihnen auch zu einigen Klassen von Veränderlichen, wie denen vom Typus R Coronae, U Geminorum und Mira Ceti, wodurch weitere Belege dafür geliefert werden, daß die Novae nicht so weit abseits der normalen Sternentwicklung stehen, wie es früher schien. Bei der Klasse R Coronae borealis sind es spektrale und andere Anzeichen, die nach Ludendorff auf irgendeinen noch ungeklärten Zusammenhang zwischen diesen und den Neuen Sternen hinzuweisen scheinen.

Der Lichtwechsel.

Die Art des Lichtwechsels unserer zweiten Klasse von Veränderlichen möge an R Coronae selbst beschrieben werden. R Coronae borealis ist gewöhnlich, d. h. in seinem offenbar normalen Zustande, ein Stern 6. Größe von nicht auffallender gelblicher Färbung. In ganz unberechenbaren, unregelmäßigen Intervallen, deren Länge zwischen Monaten und Jahren schwankt, nimmt die Helligkeit ab, durchläuft ein Minimum und erreicht schließlich wieder ihren normalen Betrag, den sie niemals zu überschreiten scheint. Letzteres ist wesentlich für die Erklärung des Lichtwechsels, der offenbar durch ein das Licht des Sternes abschwächendes Medium verursacht wird, das zeitweise zwischen uns und den Stern tritt und mit diesem in irgendeinem physischen Zusammenhang steht.[117]) Der Verlauf der Helligkeitsminima ist von Fall zu Fall verschieden. Die Tiefe der Minima schwankt zwischen 1^m, oder weniger, und 9^m, ihre Dauer zwischen wenigen Monaten und mehreren Jahren. Meistens ist die Helligkeitsabnahme schneller als die Zunahme. Absteigender und ansteigender Ast der Minima sind entweder glatt oder mit sekundären Wellen besetzt. Ferner kommen

regelmäßige, symmetrische Minima vor, die ganz wie Bedeckungsminima aussehen. In dem Zeitraum 1863—74 ist der Veränderliche überhaupt niemals in der normalen Helligkeit gewesen. Der Lichtwechsel ist als völlig regellos anzusehen. Das Spektrum ist vom Typus F 5, jedoch sehr abnorm; die Wasserstofflinien sind weder als Absorptions- noch als Emissionslinien sichtbar, stehen also offenbar auf der Grenze zur Umkehr. Zeitweilig scheinen helle Linien vorhanden zu sein. Über die Radialgeschwindigkeit ist nichts Näheres bekannt. Das Spektrum.

Im wesentlichen ähnlich sowohl in photometrischer wie — soweit bekannt — in spektraler Beziehung sind RY Sagittarii, SU Tauri, T Orionis, X Persei und U Lupi, wenn auch in quantitativer Hinsicht erhebliche Unterschiede bestehen. Bei einigen dieser Sterne, z. B. RY Sagittarii, wird anscheinend die normale Helligkeit zuweilen überschritten. Nach einer Untersuchung Ludendorffs gehören wahrscheinlich oder möglicherweise zu derselben Klasse noch die mit einem veränderlichen Nebelfleck in Verbindung stehenden Veränderlichen T Tauri, R Monocerotis und R Coronae australis, sowie noch einige andere. Bemerkenswert ist, daß X Persei und T Tauri helle Wasserstofflinien — X Persei auch helle Heliumlinien bei Spektraltypus F — haben, und daß das Spektrum von R Monocerotis, RX Puppis und R Coronae australis einem Novaspektrum vom frühen bzw. späteren Stadium gleicht. Dies und der offenbare Zusammenhang mit einem Nebelfleck, der auch bei manchen Novae (Nova Persei, Nova Aquilae, η Argus u. a.) beobachtet wurde, ferner die ähnliche galaktische Verteilung beider, sind die Gründe, die eine Verwandtschaft vermuten lassen. Verwandte Veränderliche.

III. U Geminorum.[118]) Bei dieser Klasse weist die Helligkeitsbewegung sowohl auf die Neuen Sterne, wie auf die Klasse der δ Cephei-Veränderlichen hin, während das noch sehr wenig bekannte Spektrum in einiger Beziehung an ein Novaspektrum im frühen Stadium erinnert. Der Lichtwechsel ist sehr merkwürdig. In diesem Falle scheint die meist konstante Minimalhelligkeit den normalen Zustand des Sterns zu bezeichnen. In ihr verweilt der Veränderliche die längste Zeit und erhebt sich aus ihr von Zeit zu Zeit in raschem Anstieg zum Maximum, um dann etwas langsamer wieder zur Minimalhelligkeit abzunehmen. Bei den am besten bekannten Vertretern der Klasse, U Geminorum und SS Cygni, treten verschiedene Formen von Maxima auf, am häufigsten die beiden Formen der sogenannten „langen“ und „kurzen“ Maxima, die die ausgesprochene Neigung besitzen, miteinander zu alternieren. Sie unterscheiden sich wesentlich nur durch ihre Zeitdauer. Bei U Geminorum z. B. dauert durchschnittlich der Anstieg von der normalen Helligkeit (13.5^m) zum langen Maximum (9.5^m) 6 Tage, die Abnahme vom Maximum zur gewöhnlichen Helligkeit 14 Tage; der Anstieg zum kurzen Maximum (9.8^m) $3\frac{1}{2}$ Tage, die Abnahme 9 Tage. Die langen Maxima sind flach, die kurzen spitz. Der Verlauf ist übrigens von Fall zu Fall merklich verschieden. Daneben kommen besonders bei SS Cygni noch eine dritte „symmetrische“ Form und anomale Erscheinungen vor, auch treten nicht selten kleine Auf- U Geminorum. Die Lichtkurve Gesetzmäßigkeiten.

hellungen des Sternes zur Zeit der Minimalhelligkeit auf. Von Zeit zu Zeit unterliegt der Lichtwechsel von SS Cygni großen Störungen, die seinen ganzen Charakter verändern. Die Zwischenzeiten zwischen den Maxima sind äußerst schwankend, sie betragen z. B. bei U Geminorum 62 bis 152 Tage. In neuerer Zeit hat man einige Tatsachen ermittelt, die vielleicht einmal einen Schlüssel zur Aufklärung dieses rätselhaften Lichtwechsels liefern werden. Nijland bemerkte, daß die Lichtkurve der langen Maxima sehr genau durch Addition der Lichtkurven der kurzen und der symmetrischen erhalten wird. Leiner findet, daß die von ihm beobachteten Maxima der Jahre 1917—20 sich durch eine mittlere Periode von 30.5 Tagen und einem Sinusglied von 19—20 Einzelperioden und etwa 10 Tagen Amplitude darstellen lassen, wobei jedoch einzelne Maxima entweder ganz ausfallen oder doch nur in schwachen Aufhellungen bestehen.

Das Spektrum.

Über das Spektrum ist wegen der Lichtschwäche aller dieser Sterne nur wenig bekannt. Sein allgemeiner Charakter entspricht bei U Geminorum und SS Cygni nach Fleming dem Typus F. Die Kalziumlinien H und K sind breit und kräftig, dagegen die Wasserstofflinien meistens ungewöhnlich schwach, zuweilen ganz unsichtbar und zuweilen als Emmissionslinien auftretend. Mitunter scheint das Spektrum aus zwei übereinandergelagerten Spektren zu bestehen. Dies in Verbindung mit Nijlands Feststellung läßt vermuten, daß die Veränderlichen der III. Klasse vielleicht enge Doppelsterne sind. Möglich ist aber auch das zeitweilige Vorhandensein mehrerer Sätze von Linien nach Art der in den Novaspektren gefundenen. Über die Radialgeschwindigkeit ist bisher nichts bekannt geworden. Einigen Beobachtern ist bei U Geminorum das blaue planetarische Licht und das zuweilen verwaschene und nebelartige Aussehen des Sternes aufgefallen. Pogson hat zu zwei verschiedenen Zeiten seine Helligkeit innerhalb Sekunden auf- und abschwanken gesehen, und dies dauerte einmal eine halbe Stunde lang. Es ist auf solche Wahrnehmungen im allgemeinen nicht viel zu geben, sie seien aber erwähnt, da ganz ähnliche Wahrnehmungen von einigen Neuen Sternen vorliegen. Das nebelartige Aussehen ist vielleicht auf starke Emmissionsbänder zurückzuführen, die auch bei den Novae die Farbenvereinigung in Refraktoren stark beeinflussen.

Besondere Wahrnehmungen.

μ Cephei, η Geminorum, R Scuti.

IV. μ Cephei, η Geminorum, R Scuti. Weniger scharf umrissen als die vorhergehenden Klassen erscheint die nunmehr zu betrachtende. Es ist nicht ausgeschlossen, daß sie überhaupt nicht den Wert einer selbständigen Klasse beanspruchen kann, sondern den drei folgenden angegliedert werden muß, die auch unteinander enge Beziehungen verraten. Der Lichtwechsel besteht bei einem Teil der in diese Klasse zusammengefaßten Veränderlichen in einem beständigen Fluktuieren der Helligkeit, meistens nur um wenige Zehntel einer Größenklasse, doch kommen auch erhebliche Amplituden vor. In diesen Schwankungen ist in der Regel keine Gesetzmäßigkeit zu erkennen, nur zuweilen, wie bei μ Cephei nach den Untersuchungen Plassmanns, liegen Anzeichen für das Vorhandensein mehrerer übereinandergelagerter Perioden

Der Lichtwechsel.

vor, von denen einzelne immer wieder nachweisbar sind, aber mit häufig und sprungweise veränderter Ausgangsepoche. Verhältnismäßig einfach ist der Lichtwechsel von η Geminorum. Er besteht aus flachen, zuweilen auch schärfer ausgeprägten Minima mit dazwischenliegenden Zeiträumen konstanter (normaler) Helligkeit. Die Dauer der Minima ist annähernd immer gleich und meistens ist es auch die Zwischenzeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Minima, die im Durchschnitt 231.8 Tage beträgt. Die Dauer der Minima beträgt im Mittel 105 Tage. Die Minima sind häufig von einer Form, wie sie bei den Bedeckungsveränderlichen beobachtet wird. Trotzdem kann hier von Bedeckungen nicht die Rede sein, dafür ist die Dauer der Minima im Verhältnis der Periode zu lang und ihre Form zu veränderlich, ganz abgesehen von dem Mangel jeder spektralen Evidenz. Auch bei diesem Veränderlichen ist das Abreißen einer Minimumreihe und das Auftreten einer neuen mit verschobener Ausgangsepoche beobachtet worden. So offen zutage tretende Gesetzmäßigkeiten wie bei η Geminorum sind in dieser Klasse selten, meistens ist überhaupt nichts Gesetzmäßiges feststellbar. Der dritte als Beispiel angeführte Veränderliche, R Scuti, zeigt zu Zeiten bestimmte Perioden, die aber nicht von Dauer sind. Um die Mitte des 19. Jahrhunderts war nach Argelander eine mittlere Periode von 71 Tagen wahrscheinlich, gegenwärtig ist nach Leiner eine etwa doppelt so große Periode angedeutet; immer sind aber starke Schwankungen in den einzelnen Zwischenzeiten vorhanden. Der Umfang des Lichtwechsels ist ebenfalls sehr wechselnd, zuweilen ist er fast unmerklich klein, zu andern Zeiten wieder beträgt er mehrere Größenklassen. R Scuti erinnert in einiger Beziehung an die Veränderlichen der Klasse VI. Viel langsamer als bei den bisher betrachteten Beispielen der IV. Klasse verläuft im allgemeinen der Lichtwechsel von α Orionis oder ρ Cassiopeiae bei einer Amplitude von etwa einer halben Größenklasse. Auch bei diesen Sternen konnte bisher keine bestimmte Gesetzmäßigkeit gefunden werden.

In der Klasse IV ist die ganze zweite Hälfte der Spektralreihe, von G oder K bis N, vertreten. Auch sind von der normalen Spektralreihe stark abweichende Spektren (z. B. ρ Cassiopeiae) ziemlich häufig. Daraus folgt, daß der Lichtwechsel nicht von dem Entwicklungszustand der Sterne allein bedingt wird, sondern daß noch irgendeine andere, vom Entwicklungszustand unabhängige Ursache vorhanden ist. Man müßte ja sonst erwarten, daß sämtliche Sterne mit fortgeschrittenem Spektrum merklich veränderlich sind, was durchaus nicht der Fall ist. Da zwischen den unregelmäßigen Veränderlichen der IV. Klasse und den langperiodischen Veränderlichen der V. Klasse alle möglichen Übergänge vorhanden sind, da ferner sowohl in der IV. Klasse das für die V. typische Spektrum Md auftritt, wie umgekehrt die in der ersteren Klasse so häufig vertretenen Klassen Ma, Mb, Mc, N auch in der letzteren vorkommen, so scheint es kaum berechtigt, diese beiden Klassen als physikalisch wesentlich verschieden voneinander zu betrachten. Das Spektrum.

V. Miratypus. Diese Klasse ist sowohl in photometrischer wie in spek- Der Miratypus

traler Beziehung einheitlicher als die vorangehende, indem einesteils nur diejenigen Veränderlichen zu ihr gerechnet werden, deren Lichtwechsel ohne weiteres erkennbar periodisch ist — wenn auch meistens mit starken Schwankungen der Periode und der Form der Lichtkurve — andererseits in den weitaus meisten Fällen das Spektrum der Klasse Md angehört. Wohl kommen die Typen Ma, Mb, Mc und N auch vor, aber sie sind recht selten. Frühere Spektraltypen fehlen ganz. Die Klasse ist benannt nach dem ältesten Vertreter derselben, Mira (o) Ceti.

Charakter des Lichtwechsels.

Der Lichtwechsel ist langperiodisch und in der Regel von großem Umfange; durchschnittlich beträgt der Umfang über 4 Größenklassen, erreicht aber in einzelnen Fällen 8 oder 9 Größenklassen. Andererseits ist der Lichtwechsel in der Regel unregelmäßig, wenn die Amplitude weniger als etwa 2 Größenklassen beträgt. Die Form der Lichtkurve sowohl wie die Zwischenzeit zwischen den einzelnen Maxima oder Minima ist bei den meisten dieser Sterne erheblichen Schwankungen unterworfen. Die Schwankungen der Periode verlaufen häufig mehr oder wenig periodisch, können aber auch abrupt sein und erinnern dann an die Störungen des Lichtwechsels mancher Sterne der Klassen IV und VI. Niemals aber sind die Ungleichheiten der Periode so beständig, daß eine genaue Voraussage der Maxima und Minima der Helligkeit auf längere Zeit möglich wäre. Völliges Fehlen solcher Ungleichheiten ist selten, völlige Konstanz der Lichtkurve bisher nicht beobachtet. Die Periodenwerte zeigen eine Häufung um den Wert 300 Tage. Die untere Grenze der Perioden kann man etwa bei 100 Tagen ansetzen, da bei kleineren Werten die Zugehörigkeit zur VI. Klasse in Frage kommt. Die obere Grenze ist unbestimmt, Perioden über 500 Tage sind sehr selten, und nur eine Periode unter mehreren hundert bekannten Fällen ist länger als 800 Tage. Eine typische Form der Lichtkurve kann man kaum angeben. Am häufigsten ist wohl die Form mit schnellem Anstieg der Helligkeit, flachem Maximum, langsamerem Abstieg und flachem Minimum. Aber es kommen alle möglichen Variationen mit spitzem Maximum, spitzem Minimum, gleichschnellem An- und Abstieg usw. vor. Häufig sind die Lichtkurven mit einer oder mehreren sekundären Wellen besetzt, die jedoch fast nie im Anstieg der Helligkeit auftreten.

Unterklassen des Miratypus.

Phillips hat die Lichtkurven einer großen Zahl von Veränderlichen des Miratypus einer harmonischen Analyse unterzogen und die Gesetzmäßigkeiten, die sich dabei für gewisse Koeffizienten der Reihenentwicklung ergaben, zur Einteilung der langperiodischen Veränderlichen in zwei Gruppen benutzt. Ähnliche Einteilungen, die sich ebenfalls auf die Form der Lichtkurven stützen, sind von Pickering und von Turner versucht worden, die, wie Hagen[119]) gezeigt hat, in naher Beziehung zueinander stehen. Die Phillipssche Einteilung wird neuerdings auch auf die Veränderlichen der Klasse VII ausgedehnt, die aus mehreren Gründen der Miraklasse verwandt zu sein scheint. Eine überzeugende physikalische oder geometrische Interpretation dieser Einteilung steht noch aus.

R Hydrae, ein Sonderfall.

Einen merkwürdigen Sonderfall des Miratypus, was das Verhalten der

Periode anbetrifft, stellt der von Ludendorff eingehend untersuchte Veränderliche R Hydrae dar, dessen Zugehörigkeit zu dieser Klasse nach Spektrum (Md) und Art des Lichtwechsels nicht wohl bezweifelt werden kann. Die Periode des Lichtwechsels hat seit 1784 beständig abgenommen. Sie betrug 1784 497 Tage, 1914 402 Tage. Es ist klar, daß ein solcher Fall jeder Theorie des Miratypus ernste Schwierigkeiten bereiten muß.

Das Spektrum.

Sehr bemerkenswerte Feststellungen sind in jüngster Zeit bezüglich des Spektrums einiger Mirasterne gemacht worden. Das normale Spektrum (Md) eines Mira-Veränderlichen stellt sich dar als Spektrum mit hellen Wasserstofflinien und mit den mehr oder weniger ausgeprägten Absorptionsbändern, die für den III. Spektraltypus charakteristisch sind. Die sicher vorhandenen, mit dem Lichtwechsel einhergehenden periodischen Veränderungen des Spektrums (und des Farbenindex) sind noch nicht genauer untersucht. Man kann jedoch mit allgemeiner Gültigkeit sagen, daß der Umfang des photographischen Lichtwechsels erheblich größer ist als der des visuellen. Es ist auch noch nicht sicher festgestellt, ob die Radialgeschwindigkeit sich periodisch ändert oder nicht. Nach Merrill waren die Emissionslinien des Wasserstoffs zur Zeit der Maximalhelligkeit bei fünf hellen Mirasternen gegen die Absorptionslinien durchschnittlich um 23 km nach Violett verschoben; dies scheint charakteristisch für diese Sterne zu sein. In letzter Zeit sind nun zwei weitere sehr merkwürdige Beobachtungen an den Spektren von Mirasternen gemacht worden. In dem Spektrum von R Aquarii, das von Fleming (Harv. Ann. 56) mit Md8 bezeichnet wird, traten, wie Merrill photographisch feststellte, im Herbst 1919, etwa einen Monat vor dem Maximum, die drei hellen Hauptnebelbänder λλ 5007, 4959, 4363 auf. Visuelle Beobachtungen auf der Berlin-Babelsberger Sternwarte bestätigten nicht nur diese Bänder, sondern machten auch eine helle Linie bei D (Helium?) wahrscheinlich. Die zweite Beobachtung betrifft das Spektrum von o Ceti, wahrscheinlich zur Zeit des Helligkeitsminimums, was auf dem bisher allein vorliegenden Telegramm vom Mount Wilson nicht ausdrücklich angegeben ist, aber aus dem Datum des Telegramms folgt. Danach waren helle Heliumlinien (die im Maximum nicht nachgewiesen sind) vorhanden, die Emissionslinien des Wasserstoffs waren kräftiger als sonst und stark verbreitert und im Vergleich zu den schmalen sonstigen Emissionslinien um 100 km nach Rot verschoben. Aus diesen spärlichen Daten scheint hervorzugehen, daß der Lichtwechsel in der Hauptsache durch die Schwankungen der Helligkeit des kontinuierlichen Spektrums hervorgerufen wird, und daß die Wasserstoffemissionen im Maximum schmal und gegen Violett verschoben, im Minimum dagegen breit und gegen Rot verschoben sind. Nimmt man dies zusammen mit der Beobachtung der Nebellinien an R Aquarii, so ergibt sich eine Ähnlichkeit mit den Neuen Sternen, die sicherlich nicht ohne tiefere Bedeutung sein wird.

Auftreten der Hauptnebellinien.

Anscheinend periodische Verschiebungen der Emissionslinien.

Auch in der Klasse V sind Spektren verhältnismäßig häufig, die von der normalen Serie, wenn man Md und N überhaupt dazu rechnen darf, stark abweichen.

R Sagittae. VI. R Sagittae. Die Veränderlichen dieser Klasse scheinen den Übergang zwischen den Mirasternen und der Klasse VII zu bilden, indem sie Merkmale beider Klassen in sich vereinigen. Auch bezüglich der Periodenlänge stehen sie zwischen den beiden Klassen. R Sagittae hat einen Lichtwechsel von mäßigem Umfang, der niemals zwei Größenklassen erreicht. Die Lichtkurve ist außerordentlich veränderlich, die Periode indessen recht konstant. Sie beträgt 70.35 Tage. Charakteristisch sind die plötzlichen, dauernden Änderungen der Lichtwechselphasen, die zuweilen von einem gänzlichen Abflauen und darauffolgenden Wiederaufleben des Lichtwechsels begleitet sind, ähnlich wie es bei η Geminorum und anderen Veränderlichen der Klasse IV beobachtet wird. Dies scheint auf eine gewisse Ähnlichkeit der physikalischen Ursachen des Lichtwechsels hinzuweisen.

Art des Lichtwechsels. Die Form der Lichtkurve von R Sagittae ist meistens derjenigen der Mirasterne oder der δ Cephei-Sterne der folgenden Klasse ähnlich. Häufig ist aber ein stark ausgebildetes zweites Minimum nahezu in der Mitte zwischen den Hauptminima vorhanden, was der Lichtkurve fast das Aussehen der Lichtkurve eines Bedeckungsveränderlichen vom β Lyrae-Typus verleiht. Zeitweise war das Nebenminimum vorübergehend stärker ausgebildet als das Hauptminimum, zu andern Zeiten fehlte es ganz.

Das Spektrum. Über das Spektrum der Veränderlichen der VI. Klasse, die sämtlich geringe Helligkeit haben, ist fast nichts bekannt. Es ist anzunehmen, daß es keine hellen Linien hat, da diese noch bei viel schwächeren Sternen feststellbar sind. Das Spektrum von R Sagittae scheint dem Typus G anzugehören, es sind aber nur die Kalziumbänder H und K sichtbar, was vielleicht auf *c*-Charakter des Spektrums zurückzuführen ist. Über die Radialgeschwindigkeit ist unter diesen Umständen noch gar nichts ermittelt.

δ Cephei, ζ Geminorum, R R Lyrae. VII. δ Cephei, ζ Geminorum, R R Lyrae. Diese drei Sterne vertreten die Unterabteilungen, in die man die sehr umfangreiche VII. Klasse zerlegen kann, ohne daß damit jedoch gesagt werden will, daß fundamentale physikalische Unterschiede zwischen denselben bestehen. Zwischen den beiden Arten δ Cephei und ζ Geminorum ist es die Verschiedenheit der Form der Lichtkurve bei sonst gleichen physikalischen Verhältnissen, zwischen den beiden Arten δ Cephei und R R Lyrae die verschiedene Länge der Periode und der verschiedene Spektralcharakter, wodurch ein Unterscheidungsmerk-

Charakter des Lichtwechsels. mal gegeben ist. Die Lichtkurven der δ Cephei- und R R Lyrae-Art sind meistens sehr asymmetrisch, mit steilem Anstieg zum Maximum und langsamerem Abfall zum Minimum. Sekundäre Wellen wurden fast nur auf dem absteigenden Ast der Lichtkurve beobachtet und sind gewöhnlich sehr veränderlichen Charakters. Die Lichtkurven der δ Cephei-Sterne sind langsam und wenig, die der R R Lyrae-Sterne schnell und ziemlich beträchtlich veränderlich. Die ζ Geminorum-Sterne scheinen sich in dieser Beziehung wie die δ Cephei-Sterne zu verhalten. Ihre Lichtkurven sind symmetrischer als die der letzteren. Der Umfang des Lichtwechsels ist niemals groß, selten über eine Größenklasse. Die Periodenlänge ist bei den R R Lyrae-Sternen unter

einem Tag, mit ausgesprochener Häufung um den Wert 0.5 Tage, bei den δ Cephei-Sternen zwischen 1 Tag und 1—2 Monaten, mit ausgesprochener Häufung um den Wert $5^1/_2$ Tage. Die Grenze zwischen den RR Lyrae- und δ Cephei-Sternen ist natürlich nicht scharf zu ziehen, ebensowenig die Grenze zwischen den δ Cephei- und den R Sagittae-Sternen. Die wenigen bekannten ζ Geminorum-Sterne stehen bezüglich der Periodenlänge den δ Cephei-Sternen nahe. Die Perioden sind in der Regel sehr konstant; nur wenige Fälle auffallender Änderungen der Periode sind bisher bekannt geworden, wofür als Beispiele RR Lyrae und ζ Geminorum genannt seien. Ob die Ungleichheiten der Periode dieser Sterne periodisch sind oder mehr von dem pseudo-periodischen Charakter der Ungleichheiten der Mirasterne, ist noch ungewiß.

Das Spektrum.

Die Veränderlichen der VII. Klasse verteilen sich nahezu über die ganze Spektralreihe, indessen nicht gleichmäßig, sondern in der Weise, daß die Unterarten bestimmte Spektraltypen bevorzugen. So haben die gewöhnlichen δ Cephei-Sterne und die ζ Geminorum-Sterne am häufigsten ein Spektrum vom Typus F oder G, die RR Lyrae-Sterne ein solches vom Typus A oder F. Das Vorkommen folgender Spektraltypen ist festgestellt: B (β Cephei, 12 Lacertae), A (SW Andromedae), F, G, K, K 5 (U Vulpeculae), N (V Arietis), R (RU Camelopardalis). Das Fehlen des Typus M ist zweifellos nur zufällig, indem für sehr viele Veränderliche dieser Klasse das Spektrum noch nicht bestimmt worden ist. Ein O-Stern ist bisher noch nicht als veränderlich nach Art der Klasse VII erkannt worden, wahrscheinlich haben die etwa vorhandenen δ Cephei- und verwandten Veränderlichen unter den O-Sternen ebenso wie die beiden vom B-Typus sehr kleine Helligkeitsschwankungen und sind deshalb bisher noch nicht aufgefunden worden. Im übrigen ist also praktisch die ganze Spektralreihe in dieser Klasse von Veränderlichen vertreten, was beweist, daß der Spektralcharakter, d. h. das Entwicklungsstadium, nur sehr wenig mit der Ursache der Veränderlichkeit zu tun hat. Beziehungen zwischen Lichtwechsel und Spektrum usw. werden später allgemein für alle Klassen erörtert werden.

Spektrale Eigentümlichkeiten.

Die Spektren der δ Cephei- und verwandten Veränderlichen weisen vielfach besondere Eigentümlichkeiten auf. Zunächst sind alle bisher genauerer Untersuchung zugänglichen Fälle durch periodisch veränderliche Radialgeschwindigkeiten charakterisiert. Die Periode der Schwankungen ist stets gleich der Lichtwechselperiode. Beide Erscheinungen stehen also in engem Zusammenhang, und dies gilt auch für die extremen Fälle wie β Cephei oder RU Camelopardalis. Die Besonderheiten der spektroskopischen Bahnen der δ Cephei- und verwandten Veränderlichen sind bereits S. 427 besprochen worden. Daneben zeigen die Spektren noch andere periodisch veränderliche oder beständige Eigenschaften. Unter den letzteren ist vor allem der *ac*- oder *c*-Charakter vieler δ Cephei-Sterne, wenigstens derjenigen vom II. Spektraltypus mit mittleren Periodenlängen, zu nennen. Die Schmalheit und Schärfe der Wasserstofflinien ist hier anscheinend als Anzeichen einer beginnenden Umkehrung der Absorptionslinien zu betrachten. Der

ζ Geminorum-Stern W Serpentis (Periode 14 Tage) hat nach Beobachtungen auf dem Mount Wilson in der Tat helle Wasserstofflinien mit einer dunklen zentralen Umkehrung. Der interessante Stern R U Camelopardalis (Periode 22 Tage) hat im Helligkeitsmaximum dunkle, im Minimum helle Wasserstofflinien. Dies weist also wieder darauf hin, daß hauptsächlich das kontinuierliche Spektrum veränderlich ist. Im übrigen verhält sich dieser Stern wie die anderen, die Radialgeschwindigkeit ist periodisch veränderlich, das negative Maximum der Geschwindigkeit fällt nahe mit dem Helligkeitsmaximum zusammen, die Linien hoher Temperatur sind kräftig usw.

Effektive Temperatur und Farbenindex der δ Cepheï- und verwandten Veränderlichen.

Die Helligkeitsverteilung im kontinuierlichen Spektrum ist periodisch veränderlich, mit ihr also auch die effektive Temperatur und der Farbenindex. Im Minimum sind die δ Cepheï- und verwandten Veränderlichen gelber als im Maximum, ihre Temperatur also im Minimum tiefer als im Maximum. Dementsprechend ändert sich der Farbenindex, und dies hat zur Folge, daß der photgoraphische Umfang des Lichtwechsels größer, zum Teil sogar erheblich größer ist als der visuelle. So ist z. B. der photographische Umfang des Lichtwechsels von η Aquilae nach Schwarzschild 1.3^m, der visuelle 0.7^m; die photographische und visuelle Amplitude von δ Cephei verhalten sich nach Wirtz wie 1.2 : 0.7, die von SU Cygni nach Wilkens wie 1.2 : 0.8, die von X Cygni nach demselben wie 1.8 : 1.0, die von ζ Geminorum nach lichtelektrischen Messungen des Verfassers wie 0.8 : 0.5 usw. Auch der Liniencharakter des Spektrums ändert sich dementsprechend. Nach den Untersuchungen von Shapley schwankt der Spektraltypus von δ Cephei kontinuierlich zwischen F 0 im Maximum der Helligkeit und G 2 im Minimum, der von η Aquilae zwischen A 8 und G 5, der von RR Lyrae zwischen B 9 und F 2 usf.

Beziehung zwischen Lichtkurve und Geschwindigkeitskurve.

Die Lichtkurven und Geschwindigkeitskurven der δ Cepheï- und verwandten Veränderlichen stehen meistens in einer merkwürdigen Beziehung zueinander, auf die S. Albrecht aufmerksam gemacht hat. Es fällt in der Regel das positive Geschwindigkeitsmaximum mit dem Minimum der Helligkeit, das negative mit dem Maximum der Helligkeit zusammen, und die Form der Geschwindigkeitskurve ist der Form der Lichtkurve oft erstaunlich ähnlich. Doch gibt es auch Ausnahmen von dieser Regel.[120])

Bedeckungsveränderliche.

VIII. Bedeckungsveränderliche. Während die physikalische Erklärung der bisherigen Klassen von Veränderlichen Schwierigkeiten bereitet, die zum Teil noch nicht überwunden sind, kann über die Deutung der VIII. Klasse kein Zweifel bestehen. Die Bedeckungsveränderlichen sind Doppelsternsysteme, deren Bahnebenen einen so kleinen Winkel mit der Gesichtslinie einschließen, daß während jedes Umlaufes allgemein zwei gegenseitige Bedeckungen der Komponenten stattfinden. Sind die Komponenten kugelförmig, so entsteht die typische Algollichtkurve, bei der die Helligkeit außerhalb der Bedeckungen nicht merklich veränderlich ist; sie entspricht der Summe der Helligkeiten der beiden Komponenten. Die Bedeckungen selbst prägen sich in der Lichtkurve als meist sehr nahe symmetrische Minima aus, deren Form von den Konstanten des Systems abhängt. Ist die

Ursache der Veränderlichkeit.

Bedeckung nur eine teilweise oder sind die beiden Komponenten gleich groß, so sind die Minima spitz; sind die Komponenten ungleich groß und die Bedeckungen nahezu zentral, so wird im allgemeinen die eine Bedeckung eine ringförmige, die andere eine totale sein. Beide Minima haben dann einen konstanten oder nahezu konstanten Teil, dessen Dauer der Dauer der totalen bzw. ringförmigen Bedeckung entspricht. Sind die Flächenhelligkeiten der Komponenten gleich, so sind die beiden Minima gleich tief, sind sie ungleich, so entspricht das tiefere Minimum der Bedeckung der Komponente mit der größeren Flächenhelligkeit durch die andere. Ist die Flächenhelligkeit einer Komponente im Vergleich zur anderen sehr gering, so ist in jedem Umlauf nur ein Minimum merklich. Ist die Bahn merklich elliptisch, so werden im allgemeinen die Zwischenzeiten zwischen den aufeinanderfolgenden Minima nur abwechselnd gleich sein. Ferner kann die Dauer der Minima verschieden sein, ja das eine eine partielle Bedeckung anzeigen, während das andere einer totalen bzw. ringförmigen entspricht. Kurz, die Lichtkurve ermöglicht es, die physische Beschaffenheit des Systems zu ermitteln. Sind die Komponenten nicht kugelförmig, sondern infolge ihrer gegenseitigen Anziehung gegeneinander verlängerte eiförmige Körper (in erster Näherung als ähnliche und ähnlich gelagerte dreiachsige Ellipsoide zu betrachten), so entbehrt die Lichtkurve eines konstanten Teiles, und es entsteht die typische β Lyrae-Kurve. Bei dieser ist über den Bedeckungslichtwechsel ein zweiter Lichtwechsel gelagert, der von der Rotation der eiförmigen Komponenten herrührt. Die Konstanten, die man im günstigsten Falle unter gewissen vereinfachenden Voraussetzungen aus der Lichtkurve ableiten kann, sind folgende: Die große Halbachse der größeren Komponenten in Einheiten der großen Halbachse der Bahn, das Verhältnis der großen Halbachsen der beiden Komponenten, ihre Elliptizität, d. h. das Achsenverhältnis des Rotationsäquators — die dritte, auf ihm senkrechte Achse kann durch mechanische Erwägungen ermittelt werden — ferner die Elliptizität der Bahn und die Zeit des Durchgangs durch das Periastron, die Helligkeit der Komponenten in Einheiten der Gesamthelligkeit des Systems und das Verhältnis der Flächenhelligkeiten derselben, die Neigung der Bahnebene gegen die Tangentialebene an der Sphäre im Ort des Sternes, die durchschnittliche Dichtigkeit der beiden Komponenten. Ist die spektroskopische Bahn des Systems bekannt, so kommt hinzu die Kenntnis der wahren Dimensionen der Komponenten und die Dichtigkeit jeder Komponente. Ist auch die Parallaxe bekannt, so sind die absoluten Helligkeiten und die Flächenhelligkeiten selbst gegeben. Der Verlauf der Bedeckungsminima wird noch durch die Helligkeitsverteilung auf den Scheiben der Komponenten beeinflußt. Insbesondere kommt die gegenseitige Beleuchtung der Komponenten und der Helligkeitsabfall nach dem Rande der Scheiben infolge der Absorption des Lichts in den Atmosphären der Sterne in Betracht, der ja auch bei der Sonne sehr merklich ist. Bisher ist es jedoch noch nicht möglich gewesen, diesen von der Konstitution der Sternatmosphären bedingten Abfall quantitativ zu bestimmen.

Charakteristische Beispiele: Algol.

Einige charakteristische Fälle von Bedeckungsveränderlichen mögen etwas näher betrachtet werden, zunächst der Prototyp der ersten Abteilung der Klasse, β Persei oder Algol, nach dem die reinen Bedeckungsveränderlichen auch Algolsterne genannt werden. Der Lichtwechsel ist sehr genau selenphotometrisch von Stebbins erforscht worden. Auf Grund der mathematischen Theorie von Russell findet Shapley folgende Systemkonstanten: Helligkeit der helleren Komponente in Einheiten der normalen oder Gesamthelligkeit 0.907, der schwächeren 0.093; Radien der beiden Komponenten in Einheiten der großen Halbachse der Bahn, und zwar der helleren 0.208, der schwächeren 0.228; Neigung der Bahnebene gegen die Sphäre 83^0; Dichten der Komponenten unter der Annahme gleicher Massen derselben 0.092 und 0.070 der Dichte der Sonne. Die Flächenhelligkeit der helleren Komponente ist 11.6 mal größer als die der schwächeren. Die Bedeckungen sind partielle. In der von Stebbins bestimmten Lichtkurve ist die Tiefe des Hauptminimums 1.22^m, des Nebenminimums 0.06^m. Die Periode beträgt 2.867 Tage und die normale oder Maximalhelligkeit 2.2^m. Das Spektrum ist B 8. Die schwächere Komponente ist im Spektrum nicht sichtbar, daher das Massenverhältnis nicht bekannt. Sie ist aber nicht vollkommen dunkel, was ja schon aus dem Vorhandensein des zweiten Minimums hervorgeht. Ihr Licht rührt teils von ihr selbst her, teils ist es reflektiertes Licht von der helleren Komponente. Beide Komponenten sind auf der einander zugekehrten Seite heller, und zwar infolge der Beleuchtung und Erwärmung durch die andere Komponente, und dies gibt bei der schwächeren Komponente einen merklichen Effekt. Die „dunkle" Komponente von Algol ist selbst nichtsdestoweniger wahrscheinlich heller als die Sonne; die helle ist erheblich lichtstärker als die Sonne. Da die Parallaxe des Veränderlichen noch unsicher ist, so können genauere zahlenmäßige Angaben über die wahre Helligkeit und Flächenintensität der Komponenten nicht gemacht werden. Nimmt man die Parallaxe zu 0.07″ an, so ist nach Stebbins' Berechnung das Gesamtlicht beider Komponenten etwa das 26-fache des Lichts der Sonne, das Gesamtlicht der schwächeren Hemisphäre des Begleiters das 1.7-fache, das der helleren Hemisphäre das 3.0-fache des Sonnenlichts (Sonne $= -26.6^m$). Die wahren Dimensionen der Komponenten und der Bahn sind wegen der Unsichtbarkeit des Begleiters im Spektrum unbekannt.

Aurigae.

Ein ähnliches System, in dem aber beide Komponenten gleich hell sind, so daß im Spektrum die Linien beider gemessen werden können, bildet β Aurigae, dessen Veränderlichkeit von Stebbins mit dem Selenphotometer entdeckt wurde. Die Bedeckungsminima sind nur 0.076^m tief; dazu kommt eine sehr kleine Schwankung von 0.011^m infolge leichter Elliptizität der Komponenten, die rund 0.01 beträgt. Die Periode ist 3.96 Tage. Die Neigung der Bahn gegen die Sphäre ist 77.2^0. Indem die spektroskopischen Elemente von Baker zugrunde gelegt wurden, nach denen $(a_1 + a_2) \sin i = 11.98$ Mill. km ist, ergab sich in Einheiten der entsprechenden Größen für die Sonne:

Radien jeder der beiden gleich großen Komponenten 2.58, Masse der Komponente I 2.38, der Komponente II 2.34, Dichtigkeit jeder Komponente 0.14. Der Radius der Sonne beträgt 0.7 Mill. km und ihre Dichte das 1.4-fache der Dichte des Wassers. Nimmt man die Parallaxe zu 0.024″ an, so ist die Helligkeit jeder Komponente 125 mal und die Flächenintensität 19 mal größer als die der Sonne. Das Spektrum von β Aurigae ist A o.

Ein System mit ausgesprochen elliptischen Komponenten ist zunächst β Lyrae. β Lyrae selbst. Infolge starker spektraler Besonderheiten sind jedoch in diesem System die Verhältnisse noch nicht ganz geklärt. Aus einer neueren Untersuchung von Baade, die sich auf 18 Potsdamer Spektrogramme von Hartmann gründet, ergaben sich die gleichen Elemente wie die auf S. 421 für die B 8-Komponente mitgeteilten. Für das Massenverhältnis ergab sich $m_{B5} : m_{B8} = 2.5$; $m_{B5} = 16.7$, $m_{B8} = 6.7$ Sonnenmassen. Die photometrischen Elemente nach lichtelektrischen Messungen sind in runden Zahlen: Elliptizität der Komponenten 0.59, das Verhältnis der Achsen des Äquatordurchschnitts also 1 : 0.8, Neigung der Bahn 90°, große Halbachse der B 5-Komponente in Einheiten der großen Halbachse der Bahn 0.5, der B 8-Komponente 0.3, größte Helligkeit in Einheiten des Gesamtlichts bzw. 0.55 und 0.45. Verhältnis der Flächenintensitäten B 5 : B 8 = 0.35. Die Dichtigkeiten sind $D_{B5} = 0.0022$, $D_{B8} = 0.0060$ (Dichte der Sonne = 1). Die Bedeckungen sind total bzw. ringförmig, und im Hauptminimum wird die B 8-Komponente bedeckt. Sowohl die Lichtkurve wie die spektroskopischen Elemente zeigen Störungen teils unregelmäßigen, teils, wie es scheint, periodischen Charakters, die noch nicht erklärt werden können. Die photometrischen Messungen weisen auf eine mächtige Atmosphäre veränderlicher Durchsichtigkeit hin, die entweder die B 5-Komponente oder das ganze System umgibt. Das Spektrum hat einen sehr komplexen Charakter mit bewegten und unbewegten, hellen und dunkeln Linien, die teilweise übereinandergelagert sind. Die unbewegten, d. h. an der periodischen Bahnbewegung nicht teilnehmenden Linien, zu denen auch wie bei manchen anderen spektroskopischen Systemen vom Heliumtypus die Kalziumlinie K gehört, scheinen einer das ganze System einhüllenden „äußeren" Atmosphäre anzugehören. Der Ursprung der festen Kalziumlinie, die zuerst von Hartmann im Spektrum des spektroskopischen Doppelsterns δ Orionis entdeckt, später dann in einer ganzen Reihe anderer Systeme ebenfalls gefunden wurde, ist noch nicht ganz aufgeklärt. Nachdem jedoch nach und nach alle möglichen Zwischenstufen zwischen normal (d. h. mit gleicher Amplitude wie die anderen Linien) bewegten und völlig unbewegten Kalziumlinien gefunden worden sind, kann es kaum mehr bezweifelt werden, daß die sie erzeugenden absorbierenden Kalziumdämpfe den Systemen selbst angehören und nicht etwa unabhängig zwischen diesen und uns im Weltraum schweben. Dagegen spricht auch, daß solche Linien fast ausschließlich bei B-Sternen gefunden wurden, also offenbar mit dem Entwicklungszustand der Sterne in irgendeinem Zusammenhang stehen.

Ein einfacheres System der β Lyrae-Art ist der von Schlesinger, Ba- u Herculis.

ker und Shapley untersuchte Veränderliche u Herculis, der ebenfalls ein Spektrum vom Typus B hat. Die Periode ist 2.05 Tage, die Bahnneigung 75°, die Bedeckungen sind partielle. Die Helligkeiten der beiden Komponenten in Einheiten des Gesamtlichts sind 0.7 und 0.3, ihre großen Halbachsen in Einheiten des Radius der nahen kreisförmigen Bahn 0.31 und 0.37, oder rund 3.2 und 3.8 Mill. km. Die großen und kleinen Achsen ihrer Aquatorebenen verhalten sich wie 1 : 0.89. Ihre Massen sind 7.5 und 2.9 Sonnenmassen, ihre Dichten 0.1 und 0.02 der Dichte der Sonne. Das Verhältnis der Flächenhelligkeiten ist 3.6 : 1. Die hellere Komponente ist 5., die schwächere 6. Größe. Also auch hier hat die dichtere Komponente die größere Flächenhelligkeit und den kleineren Radius, aber im Gegensatz zu β Lyrae auch die größere Masse. In der Regel haben die helleren Komponenten auch die größere Masse.[121])

Veränderliche mit sehr kleinen Helligkeitsschwankungen.

Lichtelektrisch aufgefundene Veränderliche mit sehr kleinen Helligkeitsschwankungen.[122]) Diese Fälle bedürfen einer besonderen Betrachtung insofern, als die Frage gestellt werden kann, ob sie sich den übrigen Veränderlichen zwanglos einreihen lassen oder neue, bisher unbekannte Typen darstellen. Ein Veränderlicher mit sehr geringen Schwankungen war bereits der mit dem Selenphotometer aufgefundene β Aurigae. Er unterscheidet sich in keinem Punkte von den anderen Bedeckungsveränderlichen. Unter den bisher mit der Photozelle gefundenen Veränderlichen scheint kein reiner Bedeckungsveränderlicher vom Algol- oder β Lyrae-Typus, dagegen der δ Cephei-Typus und seine Abarten stark vertreten zu sein Dies kann nicht überraschen, da die letzteren überhaupt zahlreicher unter den Sternen vorhanden sind, und da ferner auch bei den bisher bekannten Bedeckungsveränderlichen größerer Amplitude bei genauerer Untersuchung sich fast stets Nebeneinflüsse neben dem typischen Lichtwechsel bemerkbar machen, die natürlich eine verhältnismäßig bedeutendere Rolle spielen können, wenn der Einfluß der Bedeckungen klein ist. Dies muß bei der Betrachtung der folgenden Fälle im Auge behalten werden.

ε Ursae majoris.

ε Ursae majoris. Außer der langen vierjährigen Periode dieses spektroskopischen Doppelsterns vermutete Ludendorff noch eine kurze Periode in den Radialgeschwindigkeiten mit so kleiner Amplitude, daß sie nicht sichergestellt werden konnte. Die lichtelektrischen Messungen der Helligkeit ergaben eine Helligkeitsschwankung, die eine Periode von 0.952 Tagen hat. Es ist auch eine entsprechende Schwankung der Radialgeschwindigkeit von nur $2\frac{1}{2}$ km Umfang vorhanden, aus der eine stark elliptische Bahn abgeleitet werden kann. Die Lichtkurve stellt sich als ein merkwürdiges Gemisch einer Algolkurve und einer δ Cephei-Kurve mit mehreren sekundären Wellen dar, wenigstens scheint dies die zwangloseste und nächstliegende Interpretation zu sein. Die Lichtkurve zeigt ein ausgeprägtes Maximum, das nahe mit dem Periastrondurchgang in der berechneten 0.95-tägigen Bahn zusammenfällt. Die ganze Helligkeitsschwankung beträgt nur 0.04^m. Das Spektrum ist Ap.

α Canum venaticorum. Das Spektrum (Ap) der hellen Komponente dieses visuellen Doppelsterns ist sehr eigentümlich. Die zuerst von Ludendorff bemerkten Schwankungen der Linienintensitäten sind von Belopolsky genauer untersucht worden. Sie befolgen eine $5^1/_2$-tägige Periode. Nicht alle Linien verhalten sich gleichmäßig. Ein Teil der Linien ist im Maximum der Intensität, während ein anderer Teil im Minimum ist und umgekehrt. Eine dritte Gruppe, darunter die Linien des Wasserstoffs, Kalziums, Eisens, Magnesiums, ist keinen merklichen Veränderungen unterworfen. Die erste Gruppe von Linien zeigt auch periodische Verschiebungen, die beiden anderen Gruppen scheinen nur schwach oder gar nicht bewegt zu sein. Mehrere der Linien mit wechselnder Intensität fallen nach Baxandall nahe mit den stärksten Linien des Europiums zusammen. Die lichtelektrischen Messungen ergaben kleine Helligkeitsschwankungen von derselben Periode wie die Veränderungen des Spektrums, deren Charakter 1914—1916 dem der Helligkeitsschwankungen der ζ Geminorum-Sterne am meisten glich. Vor dem Maximum der Helligkeit trat ein sekundäres Minimum ein, dessen Mitte sehr nahe mit dem Intensitätsmaximum der ersten Gruppe von Absorptionslinien zusammenfiel. Im Frühjahr 1920 war die Lichtkurve stark verändert, und bald darauf verschwand der Lichtwechsel ganz. α Canum venat.

γ Bootis zeigt schnelle Veränderungen der Radialgeschwindigkeit, deren Gesetz noch nicht erforscht ist. Die Helligkeit schwankt um 0.04^m in siebenstündiger Periode. Die Lichtkurve gleicht einer δ Cephei-Kurve mit einem stark ausgeprägten sekundären Maximum. Das Spektrum ist F o. γ Bootis.

β Cephei. Dieser spektroskopische Doppelstern mit nur vierstündiger Periode verhält sich spektroskopisch und photometrisch wie ein kurzperiodischer δ Cephei-Stern. Die Lichtkurve ist ziemlich stark und schnell veränderlich, ähnlich wie die Lichtkurven mancher RR Lyrae-Sterne. Spektrum B 1. β Cephei.

12 Lacertae ist in jeder Beziehung eine fast vollkommene Wiederholung von β Cephei. Selbst die Periode ist fast genau die gleiche. Die Lichtkurve ist noch veränderlicher als die von β Cephei, und auch die Geschwindigkeitskurve ist nach Young einem beständigen schnellen und beträchtlichen Wechsel unterworfen. Spektrum B 2. 12 Lacertae.

Boss 46. Ein spektroskopischer Doppelstern mit sehr großer Geschwindigkeitsamplitude, in dessen Spektrum beide Komponenten sichtbar sind. Periode 3.5 Tage. Spektrum B 3 p. Die Kalziumlinien H und K zeigen nur geringe Schwankungen. Die Helligkeit schwankt um 0.2^m, aber nicht, wie man hätte erwarten sollen, nach Art eines β Lyrae-Sternes, sondern in einer eigentümlichen Weise, die man am besten vielleicht als von δ Cephei-Art mit einem ungewöhnlich stark ausgeprägten sekundären Maximum bezeichnen kann. Das Hauptmaximum tritt nach dem Periastrondurchgang ein. Bedeckungen sind nicht merklich. Die Lichtkurve unterlag während des halben Jahres der Beobachtung, wenn überhaupt, nur geringen Veränderungen. Boss 46.

ζ_1 und g Ursae majoris. Das spektroskopische System der helleren ζ_1 und g Ursae majoris.

Komponente des visuellen Doppelsterns Mizar ist S. 421 mitgeteilt. Beide Komponenten sind im Spektrum sichtbar. Die Geschwindigkeitsamplitude ist sehr groß, so daß Bedeckungen erwartet werden konnten. Solche haben auch anscheinend sowohl 1911 nach selenphotometrischen Bestimmungen von Stebbins wie 1917 nach lichtelektrischen Messungen stattgefunden. Zugleich war aber ein kontinuierlicher Lichtwechsel von mindestens 0.06^m Umfang vorhanden, der sehr unbeständig in seinem Verlauf war. Er bestand aus mehreren Maxima und Minima. Später verschwand er, und gleichzeitig scheinen auch die scharfen Einsenkungen der Lichtkurve, die nahe mit den spektroskopischen Konjunktionen der Komponenten zusammenfielen und deshalb wohl von partiellen Bedeckungen herrührten, verschwunden zu sein. Weitere gelegentliche Messungen ergaben nur sehr geringen Lichtwechsel des Sterns. Spektrum A o. Der Nachbarstern g Ursae majoris gehört wahrscheinlich ebenfalls zu denjenigen spektroskopischen Doppelsternen, die nur zeitweilig merklich veränderlich sind. Die spektroskopische Periode beträgt, wie schon erwähnt, nur 0.155 Tage.

α_1 Geminorum. α_1 Geminorum. Auch an diesem spektroskopischen Doppelstern wurden eine Zeitlang nicht unbeträchtliche Helligkeitsschwankungen beobachtet, die später verschwanden. Auf einen Umlauf fielen drei Maxima und Minima. Spektrum A o. Periode 2.93 Tage.

o Persei. o Persei ist wieder ein spektroskopischer Doppelstern mit großer Geschwindigkeitsamplitude, dessen Komponenten beide im Spektrum sichtbar sind. Periode 4.42 Tage; Spektrum B 1. Die Kalziumlinien H und K haben konstante Geschwindigkeit. Die Helligkeit ist mit der 4.4-tägigen Periode veränderlich, aber in sehr komplizierter Weise. Es treten eine ganze Reihe von Maxima und Minima auf, deren genaue Zahl noch nicht feststeht, wahrscheinlich auch zu verschiedenen Zeiten verschieden ist.

φ Persei. φ Persei. Das Spektrum dieses spektroskopischen Doppelsterns hat helle und dunkle Linien ähnlich wie β Lyrae, die anscheinend teils der einen, teils der anderen Komponente angehören. Die Periode beträgt 126 Tage. Die Geschwindigkeitskurve läßt sich durch Bewegung in einer Ellipse nicht darstellen, ist außerdem veränderlich. Die Lichtkurve besteht aus einer Anzahl äquidistanter Wellen, deren Periode genau $^1/_7$ der spektroskopischen Periode beträgt. Gelegentlich fallen einzelne Wellen aus. Die wahre Periode des Lichtwechsels ist aber, wie die gelegentliche Wiederkehr einer solchen Stelle konstanter Helligkeit der Lichtkurve zur gleichen Phase der Radialgeschwindigkeitsschwankung bewies, gleich der spektroskopischen. Die Helligkeitsschwankungen erinnern an die von R Sagittae. Das Spektrum ist indessen vom Typus B.

Diese Beispiele werden zur Charakterisierung der lichtelektrisch aufgefundenen Fälle genügen. Trotz scheinbar größerer Kompliziertheit werfen sie doch manches Licht auf die Veränderlichen mit größeren Helligkeitsschwankungen, insbesondere der Klassen VI und VII. Die angezogenen Fälle betreffen sämtlich spektroskopische Doppelsterne, und zwar mit einer

Ausnahme solche mit kurzer Periode. Auch sonst wurde bei veränderlicher Radialgeschwindigkeit fast stets auch in derselben Periode wie diese veränderliche Helligkeit gefunden, wenn nur die Untersuchung hinreichend lange fortgesetzt wurde. Es scheint daher, daß zum mindesten die kurzperiodischen spektroskopischen Systeme in der Regel entweder dauernde oder zeitweilige Helligkeitsschwankungen zeigen, die mit der spektroskopischen Bewegung in Zusammenhang stehen. Man wird daher bezüglich der Veränderlichen der VII. Klasse, deren Radialgeschwindigkeit nachgewiesenermaßen ebenfalls mit der Lichtwechselperiode schwankt, zunächst zu der Annahme neigen, daß der Lichtwechsel bei ihnen in ähnlicher Weise zustande kommt, wie bei den vorhin betrachteten gewöhnlichen spektroskopischen Systemen, daß also kein wesentlicher Unterschied besteht zwischen der Natur der geringen, aber scheinbar komplizierteren Helligkeitsschwankungen gewöhnlicher spektroskopischer Doppelsternsysteme und der größeren, aber meistens einfacher verlaufenden Helligkeitsschwankungen der Veränderlichen der Klasse VI.

Statistische Betrachtungen über die Veränderlichen.

Auf die inneren Zusammenhänge der verschiedenen Klassen von Veränderlichen werfen auch statistische Betrachtungen manches Licht. Einiges hierher Gehörende wurde schon angedeutet. Ordnet man die Veränderlichen der Klassen V, VI und VII nach der Periodenlänge und teilt dann die Periodenwerte in gleiche Intervalle, so fällt nicht, wie es bei durchschnittlich gleicher Häufigkeit aller vorkommenden Periodenwerte zu erwarten wäre, in jedes Intervall eine annähernd gleiche Zahl von Veränderlichen, sondern es ergeben sich deutliche Häufigkeitsmaxima für gewisse Periodenwerte. Hertzsprung hat darauf zuerst aufmerksam gemacht. Darin gleichen sich die Klassen V und VII und vermutlich auch VI, während andererseits die ebenfalls periodische Klasse VIII ein durchaus verschiedenes Verhalten zeigt. Zunächst tritt ein Häufigkeitsmaximum für die RR Lyrae-Sterne bei dem Periodenwert 0.5 Tage ein, dann ein zweites für die übrigen δ Cephei- und verwandten Sterne bei dem Periodenwert $5\frac{1}{2}$ Tage und schließlich für die Mirasterne bei dem Periodenwert 300 Tage. Wahrscheinlich ist ein weiteres Häufigkeitsmaximum bei dem Periodenwert 60 oder 70 Tage für die R Sagittae-Sterne vorhanden, jedoch ist die Zahl der bekannten Veränderlichen dieser Art noch zu gering zur sicheren Feststellung des letzteren Häufigkeitsmaximums. Dagegen nimmt die Häufigkeit in der VIII. Klasse mit wachsender Periodenlänge beständig ab, d. h. die kürzesten Perioden sind durchschnittlich die häufigsten, wie es ja nach dem Charakter der Bedeckungsveränderlichen von vornherein zu erwarten war, indem die Wahrscheinlichkeit des Zustandekommens von Bedeckungen um so größer ist, je kleiner der Abstand der Komponenten im Verhältnis zu ihrem Durchmesser, d. h. im allgemeinen je kürzer die Umlaufszeit ist.

Häufigkeitsmaxima der Periodenlängen.

Periode und Spektrum.

Eine andere gemeinsame Gesetzmäßigkeit der Klassen V und VII betrifft das Spektrum (die Farbe) und die Periode. Der Spektraltypus ist durchschnittlich um so fortgeschrittener, je länger die Periode:

Klasse VII			Klasse V		
Periode	Durchschnittliches Spektrum	Zahl der Sterne	Spektrum	Durchschnittliche Periode	Zahl der Sterne
< 1 Tag	A7	12	Md3 — Md4	260.5 Tage	52
1— 4 Tage	F4	8	Md5 — Md6	280.7 „	81
4—12 „	G0	34	Md7 — Md8	328.2 „	64
12—20 „	G2	8	Md9 — Md10	366.0 „	27
20—46 „	G3	8			

In der Klasse V sind nur wenige Sterne der Stufen Md1 und Md2 vorhanden, so daß diese Stufen nicht in die Betrachtung einbezogen werden konnten. Die Veränderlichen der Klasse V, deren Spektrum N ist, sind vorläufig ebenfalls nur gering an Zahl, sie scheinen nicht eine Fortsetzung der obigen Reihe zu bilden, sondern für sich zu stehen; ihre durchschnittliche Periode ist 325 Tage.

Periode, Spektrum und Amplitude.

Der Umfang des Lichtwechsels hängt in der V. Klasse nicht sehr deutlich von der Periodenlänge und vom Spektrum ab; er ist bei den Md-Sternen durchschnittlich $4^1/_2$ Größenklassen, bei den N- und den anderen M-Sternen dieser Klasse erheblich kleiner. In der Klasse VII gehören zu den mehr als 12 Tage betragenden Perioden durchschnittlich um 0.5^m größere Lichtwechselamplituden als zu den kürzeren Perioden, der Durchschnitt aller Werte ist rund 1.0^m. Hierin sind die lichtelektrisch untersuchten Fälle mit sehr kleinen Amplituden nicht eingeschlossen. Vergleicht man dagegen die Lichtwechselamplitude unmittelbar mit der spektroskopischen Geschwindigkeit in der Bahn, so wächst für die spektroskopisch untersuchten helleren δ Cephei-Sterne nach Ludendorff die Lichtwechselamplitude mit der Geschwindigkeit in der Bahn; ebenso mit der Exzentrizität der Bahn.

Periode und absolute Helligkeit bei den Sternhaufenveränderlichen.

Eine sehr merkwürdige Beziehung fand Cannon für diejenigen RR Lyrae- und δ Cephei-Sterne, welche in Sternhaufen auftreten. In gewissen Sternhaufen, insbesondere den sogenannten kugelförmigen, sind diese Veränderlichen massenhaft vertreten. Da die Entfernungen der Sterne eines Sternhaufens von uns als praktisch gleich angesehen werden können, so verhalten sich die scheinbaren Helligkeiten dieser Sterne wie ihre wahren. Es zeigte sich nun, daß ihre wahre Helligkeit durchschnittlich mit der Periodenlänge wächst. Man nimmt an, daß dieses Gesetz auch für die isolierten Veränderlichen der VII. Klasse Geltung hat, und gründet darauf eine Methode der Parallaxenbestimmung der Sternhaufen.

Elliptizität und Abstand in den β Lyrae-Systemen.

Bei den Bedeckungsveränderlichen des β Lyrae-Typus besteht gemäß den Untersuchungen von Shapley noch die von vornherein zu erwartende Beziehung, daß die Elliptizität der Komponenten mit wachsendem Abstand der Komponenten abnimmt.

Galaktische Verteilung der Klassen V—VII.

Bezüglich der galaktischen Verteilung, der Stellung der Sterne zur Milchstraße, verhalten sich die Veränderlichen der V. bis VII. Klasse nicht einheitlich. Die isolierten RR Lyrae-Sterne bevorzugen die Nähe der Milchstraße nicht merklich, dagegen konzentrieren sich die δ Cephei- und ζ Gemi-

norum-Sterne sehr stark nach der Milchstraße hin. Auch die Klasse VI scheint in der Nähe der Milchstraße etwas stärker vertreten zu sein als außerhalb derselben. Die Mira-Sterne im allgemeinen sind gleichmäßig verteilt, wenngleich die beiden Gruppen von Phillips sich etwas verschieden verhalten. Die unregelmäßigen und langperiodischen N-Sterne bevorzugen, wie die N-Sterne im allgemeinen, merklich die Milchstraße, ebenso die übrigen Unregelmäßigen. Sehr starke galaktische Konzentration zeigen die Neuen Sterne, die sich in dieser Hinsicht wie die ihnen auch in anderer Beziehung nahestehenden Wolf-Rayet-Sterne verhalten, mäßige Konzentration nach der Milchstraße hin die Bedeckungsveränderlichen. Eine Tendenz zu ungleicher Verteilung in bezug auf die galaktische Länge ist bisher bei keiner Gruppe von isolierten Veränderlichen bekannt.

Mögliche Ursachen der galaktischen Konzentration.

Die galaktische Konzentration der Veränderlichen der Klassen VII und VIII kann verschiedene Ursachen haben, deren keine bisher überwiegende Wahrscheinlichkeit zu erringen vermocht hat. Sie kann ein Effekt großer Entfernung der Sterne von uns, der Orientierung der Bahn- bzw. Rotationsebenen nach einer bevorzugten Ebene (Milchstraßenebene), endlich ein kosmogonischer Effekt sein. Betrachtungen über die erste und letzte Möglichkeit gehören nicht in den Rahmen dieses Artikels; die zweite Möglichkeit hat nicht geringe Wahrscheinlichkeit für sich, konnte aber bisher weder für die spektroskopischen Doppelsterne und die Doppelstern-Veränderlichen noch für die visuellen Doppelsterne als Tatsache erwiesen werden.

Sternhaufen, Spiralnebel und Gasnebel.

i) Sternhaufen, Spiralnebel und Gasnebel. Ein großer Teil der mit den Sternhaufen und Nebelflecken verknüpften Fragen gehört teils dem folgenden Abschnitt, teils der Mechanik des Himmels an. Diese Fragen werden daher hier außer Betracht bleiben oder nur kurz berührt werden.

Historisches und Einteilung.

Die Zusammenstellung der Nebelflecken mit den Sternhaufen hat ursprünglich ihren Grund darin gehabt, daß mit der fortschreitenden Vervollkommnung der Fernrohre immer mehr Gebilde, die früher als echte Nebelflecken erschienen, in Sterne aufgelöst werden konnten, so daß man eine Zeitlang geradezu jeden Nebelfleck für auflösbar hielt, bis dann Huggins (1863) spektroskopisch einen Teil der unaufgelösten Nebelflecken als echte Gasnebel erwies. Die Mannigfaltigkeit der Formen beider Gebilde macht eine Einteilung derselben nötig, wobei sowohl physikalische und mechanische wie auf die innere Struktur unseres Sternsystems bezügliche Gesichtspunkte geltend zu machen sind. Zunächst ist eine rein physikalische Teilung der in Betracht kommenden Gebilde, ohne Rücksicht auf ihre Auflösbarkeit in Sterne, möglich, je nachdem das Spektrum ein vorwiegend kontinuierliches oder das eines leuchtenden Gases, mit oder ohne kontinuierlichen Untergrund, ist. Außer den auflösbaren Sternhaufen besitzen auch manche unauflösbaren Nebelflecke, insbesondere diejenigen mit spiraliger Struktur, ein kontinuierliches Spektrum mit Absorptionslinien und höchstens Spuren von Emissionen. Die Spiralnebel haben daher bis auf weiteres ebenfalls als Sternansammlungen zu gelten, die nur ihrer großen Entfernungen wegen mit unseren

heutigen optischen Mitteln nicht mehr aufgelöst werden können. Es sind aber schwerwiegende Gründe vorhanden, sie trotzdem nicht mit den auflösbaren Sternhaufen zusammenzustellen, sondern sie als eine Klasse für sich zu betrachten.

Einteilung der Sternhaufen.

Die eigentlichen Sternhaufen und die echten Gasnebel zerfallen ihrerseits nach physikalischen und äußeren Merkmalen in mehrere Klassen. Shapley stellt in seiner großen Untersuchung über die Sternhaufen[123]) folgende Einteilung dieser Systeme auf: 1. Kugelförmige Sternhaufen, 2. Offene Sternhaufen, 3. Bewegte Sternhaufen. Als Sternhaufen gilt dabei jede Gruppe von Sternen, deren physische Zusammengehörigkeit festgestellt oder wahrscheinlich ist. Die erste Klasse enthält die runden, gegen die Mitte dicht gedrängten Ansammlungen von zahllosen Sternen auf engem Raum, wie den bekannten Sternhaufen Messier 13 im Herkules. Die Systeme der zweiten Klasse sind im allgemeinen weniger regelmäßig geformt, gegen die Mitte weniger dicht gedrängt und weniger reich an Sternen. Jedoch herrscht hier ein großer Spielraum bezüglich der scheinbaren Ausdehnung, der Verdichtung und der Zahl der Sterne. Beispiele sind die bekannte Praesepe-Gruppe im Krebs und der Doppelsternhaufen χ und h Persei. Die dritte Klasse enthält solche Systeme wie die Hyaden oder auch die Ursa major-Gruppe, welche letztere uns deshalb nicht als Sternhaufen erscheint, weil die Sonne sich zufällig mitten in ihr befindet; auch ist die Zahl ihrer Komponenten nur gering. Die Glieder dieser Systeme haben nachweisbare gemeinsame Bewegung. Im übrigen gibt es zwischen diesen drei Klassen zahlreiche Übergänge. Zwischen den beiden ersten Klassen bestehen jedoch ganz bestimmte fundamentale Unterschiede, die später erörtert werden. Sie betreffen die galaktische Verteilung und die physikalische Beschaffenheit ihrer Komponenten. Dagegen scheinen die zweite und dritte Klasse sich hauptsächlich durch ihre verschiedene Entfernung von uns zu unterscheiden.

Einteilung der Nebelflecken.

Die Nebelflecke zerfallen nach Ausscheidung der Spiralnebel und der Spindelnebel, die mit ersteren wahrscheinlich identisch sind, in 1. die sehr ausgedehnten und sehr schwachen Nebel, die als ein feines Netzwerk große Flächen des Himmels, vielleicht den ganzen Himmel überspannen, und die ihnen offenbar nahestehenden großen unregelmäßigen Nebel nach Art des Orionnebels; 2. die kleinen regelmäßigen Nebel gleich den planetarischen und den ringförmigen; 3. die in reflektiertem Licht leuchtenden Nebel wie die Plejadennebel, die häufig mit offenen Sterngruppen, jedoch niemals mit kugelförmigen verknüpft sind. Zu den kleinen regelmäßigen Nebeln rechnet man wegen ihrer spektralen Ähnlichkeit auch die Nebelsterne, die nichts anderes zu sein scheinen als planetarische Nebel mit besonders deutlich ausgeprägten sternartigen Kern und verhältnismäßig schwacher Nebelhülle. Der Umstand, daß die Kerne der planetarischen Nebel, der Ringnebel und der Nebelsterne ein Spektrum vom Typus O besitzen, deutet auf enge Beziehungen zwischen diesen Gebilden und den Wolf-Rayet-Sternen hin.[124])

Wright stellt unter diesem Gesichtspunkte eine spezialisierte Einteilung der Gasnebel auf, deren typische Glieder eine fortschreitende Annäherung an die Spektralklasse O zeigen.[125]) Eine andere Einteilung der Nebel nach ihrem Spektrum, die in den Harvard Annalen, Bd. 76, gegeben ist, konnte noch nicht eingesehen werden. Einteilung der Gasnebel.

Von den Sternhaufen besitzen bei weitem das größte Interesse die kugelförmigen, die auch, abgesehen von einigen der helleren offenen Haufen, gegenwärtig durch die schon erwähnten Arbeiten Shapleys am besten bekannt sind. Ihre Zahl scheint nur eine beschränkte zu sein; es sind gegenwärtig 86 kugelförmige Sternhaufen bekannt, und seit langer Zeit ist der Zuwachs durch Neuentdeckungen verschwindend gering. Die galaktische Verteilung ist eine auffallend ungleichmäßige, wenigstens in Richtungen längs der Milchstraße (in galaktischer Länge), während die Verteilung in senkrechter Richtung zur Milchstraße (in galaktischer Breite) zwar auch ungleichmäßig, aber symmetrisch zur Mittellinie der Milchstraße ist. Der größte Teil aller bekannten kugelförmigen Sternhaufen liegt in den Sternbildern Ophiuchus und Sagittarius und ihrer Umgebung mit dem Zentrum bei etwa 325^0 galaktischer Länge und 0^0 galaktischer Breite ($\alpha = 17^h 30^m$, $\delta = -30^0$). Zu der Linie 145^0—325^0 ist die Verteilung ziemlich symmetrisch. Zwischen 41^0 und 195^0 galaktischer Länge ist kein kugelförmiger Sternhaufen bekannt. Am auffallendsten ist aber das fast völlige Fehlen dieser Systeme in der galaktischen Mittelzone in einer Breite von etwa 20^0. Hierdurch unterscheiden sich die kugelförmigen Sternhaufen scharf von den offenen, die gerade in dieser Mittelzone am häufigsten sind. Shapleys Untersuchungen machen verstärkte Absorption oder Abschirmung des Lichtes in der Nähe der Ebene der Milchstraße (infolge dichterer Ansammlung der Materie in dieser), an die man nach Analogie der in den ganz von der Seite gesehenen Spiralnebeln beobachteten Absorptionen denken könnte, unwahrscheinlich. Es scheint vielmehr, daß die kugelförmigen Systeme gegenüber äußeren Gravitationswirkungen überaus empfindliche dynamische Gebilde sind, die in der Nähe der großen Milchstraßenmassen sehr schnell aufgelockert werden und zerfallen und so das Material zu den offenen Sternhaufen und den Sternwolken der Milchstraße liefern. Für diese Auffassung spricht, daß die bisher bekannten Radialgeschwindigkeiten der kugelförmigen Sternhaufen ganz überwiegend negativ und von großem absolutem Betrage — durchschnittlich über 100 km/sec — sind. Dies deutet auf Annäherung an die Ebene der Milchstraße hin. Ferner spricht dafür, daß die kugelförmigen Sternhaufen im allgemeinen um so offener oder gelockerter erscheinen, je näher sie der Milchstraße stehen. Als Beispiele mögen genannt werden M 22 und ω Centauri einerseits, 47 Tucanae andererseits. Die Häufigkeit der kugelförmigen Sternhaufen ist an den beiden Rändern der von ihnen freien galaktischen Mittelzone am größten und nimmt nach außen ziemlich langsam, nach innen äußerst schnell bis auf einen kleinen Wert ab. Ganz verschieden verhalten sich die später zu betrachtenden Spiralnebel.

Die kugelförmigen Sternhaufen.

Zahl und galaktische Verteilung.

Ursachen der galaktischen Verteilung der kugelförmigen Sternhaufen.

Zugehörigkeit der kugelförmigen Sternhaufen zum System der Milchstraße.

Diese und andere auffällige Beziehungen der kugelförmigen Sternhaufen zur Milchstraße machen es in hohem Grade wahrscheinlich, daß diese Systeme Teile des großen Systems und nicht selbständige Systeme sind. Dies ist von großer Bedeutung für die Erforschung des Systems der Milchstraße, denn, wie Shapley gezeigt hat, lassen sich auf die kugelförmigen Sternhaufen statistische Methoden der Parallaxenbestimmung anwenden, die einer sehr hohen Genauigkeit fähig sind. Man erhält also auf diese Weise auch Daten über die Dimensionen des Milchstraßensystems. Die ungleichmäßige Verteilung der kugelförmigen Sternhaufen in galaktischer Länge ist dahin zu deuten, daß diese Gebilde sich in einem langgestreckten und flachen Raum anordnen, an dessen einem Ende die Sonne sich befindet. Die von Shapley angewandten Methoden beruhen auf der Voraussetzung homogener physikalischer Beschaffenheit des ganzen Milchstraßensystems, also auch der kugelförmigen Sternhaufen. Es soll z. B. die Leuchtkraft der Sterne im allgemeinen in den letzteren dieselbe obere Grenze haben wie in der Umgebung der Sonne, gewisse Typen von Sternen, wie die Heliumsterne, die Veränderlichen vom δ Cephei-Charakter oder die gelben und roten Riesensterne, sollen sich in den kugelförmigen Sternhaufen nicht wesentlich von denjenigen in der übrigen Milchstraße unterscheiden. Hat man also für die isolierten δ Cephei-Veränderlichen, roten Riesensterne usw. unserer näheren Umgebung aus den durchschnittlichen Eigenbewegungen oder durch andere statistische Methoden deren durchschnittliche Entfernungen und absolute Helligkeiten ermittelt, so kann man offenbar durch Vergleichung ihrer scheinbaren Helligkeiten mit denen der entsprechenden Klassen von Sternen in den Sternhaufen die Entfernungen der letzteren ermitteln. Für die kugelförmigen Sternhaufen kommen die Heliumsterne, die absolut hellen gelben und roten Sterne und vor allem die δ Cephei-Sterne und ihre Abarten, die in manchen dieser Systeme (sowie in den Magellanschen Wolken) in auffallend großer Zahl gefunden worden sind, in Betracht. Novae sind bisher in ihnen nicht beobachtet worden, dagegen überraschend häufig in den Spiralnebeln, für die sie in entsprechender Weise verwertet werden können. Bei der Verwendung der δ Cephei-Veränderlichen zur Bestimmung der Parallaxen der kugelförmigen Sternhaufen kommt weiter die schon S. 462 erwähnte Beziehung zwischen der absoluten mittleren Helligkeit (Mittel aus dem Maximum und Minimum der Helligkeit) und der Periodenlänge zustatten, die zuerst von Leavitt bei den δ Cephei-Veränderlichen der kleinen Magellanschen Wolke gefunden wurde.[126]) Bei den Sternhaufen-Veränderlichen tritt diese Beziehung ohne weiteres zutage; die Untersuchung ergab die Gültigkeit der Beziehung auch für die isolierten δ Cephei-Sterne, deren mittlere Parallaxen bekannt sind. Shapley erhielt so aus einem Beobachtungsmaterial von mehr als 230 Veränderlichen folgende Tabelle, in der log P der Logarithmus der Periode in Tagen, M die absolute Helligkeit ($\pi = 0.1''$) in Größenklassen bedeutet:

Bestimmung der Parallaxen der kugelförmigen Sternhaufen.

log P	M	log P	M	log P	M
+ 2.1	— 7.1 m	+ 1.2	— 3.87m	+ 0.2	— 0.99m
+ 2.0	— 6.74	+ 1.0	— 3.15	0.0	— 0.64
+ 1.8	— 6.02	+ 0.8	— 2.43	— 0.2	— 0.38
+ 1.6	— 5.31	+ 0.6	— 1.81	— 0.4	— 0.33
+ 1.4	— 4.59	+ 0.4	— 1.37	— 0.6	— 0.34

Beziehung zwischen Periode und absoluter Helligkeit der δ Cephei- und verwandten Veränderlichen.

Für die δ Cephei-Sterne mit Perioden kleiner als 1 Tag wird die absolute Helligkeit nahezu konstant und unabhängig von der Periodenlänge. Weitaus die meisten Veränderlichen in den kugelförmigen Sternhaufen und in den Magellanschen Wolken gehören zu diesen kurzperiodischen δ Cephei-Sternen.

Farbenindex und Periodenlänge.

Die schon früher erwähnte Beziehung zwischen Farbe (Spektralklasse) und Periodenlänge zeigt bei ihnen einen ganz ähnlichen Verlauf wie bei den isolierten δ Cephei-Veränderlichen. Sie muß benutzt werden, um photographische Helligkeiten in visuelle ohne Kenntnis des Spektrums verwandeln zu können. Die folgende Tabelle veranschaulicht diese Beziehung für Sterne mit auch anderweitig bekanntem Spektrum.

Mittleres Spektrum	Log. mittlerer Periode	Farbenindex
A4	— 0.26	+ 0.15m
F5	+ 0.78	+ 0.6
G5	+ 1.04	+ 1.0
K5	+ 1.26	+ 1.4
Ma	+ 1.52	+ 1.6

Rote und gelbe Giganten in den kugelförmigen Sternhaufen.

Es zeigte sich weiter, daß das Verhältnis der mittleren Helligkeit der jeweils 25 hellsten Sterne — nach Abzug von je 5 allerhellsten Sternen (um zufällige Projektionen von nicht zum System gehörenden Sternen auf dasselbe, sowie enge unaufgelöste Doppelsterne unschädlich zu machen) — zur mittleren Helligkeit der kurzperiodischen δ Cephei-Veränderlichen für alle kugelförmigen Sternhaufen mit solchen Veränderlichen konstant ist; ferner daß die scheinbaren Durchmesser der Systeme dem Quadrat der scheinbaren mittleren Helligkeit der hellsten Sterne nahe proportional, d. h. also die wahren Durchmesser aller kugelförmigen Systeme nahe dieselben sind. In Ermangelung einer hinreichenden Zahl von erforschten Veränderlichen in einem kugelförmigen Haufen können daher mit geringer Einbuße an Genauigkeit auch die mittlere Helligkeit der hellsten Sterne und schließlich sogar nur die scheinbaren Durchmesser zur Parallaxenbestimmung benutzt werden. Shapley schätzt die Genauigkeit der aus den Veränderlichen abgeleiteten Parallaxen auf etwa 10%—15%, die der aus den hellsten Sternen und den scheinbaren Durchmessern abgeleiteten Parallaxen auf 20% bzw. 25%. Die Ergebnisse stehen und fallen natürlich mit der Gültigkeit der eingangs gekennzeichneten, noch eingehend zu prüfenden Voraussetzungen.

Parallaxen von kugelförmigen Sternhaufen.

Die folgende Tabelle gibt für eine kleine Anzahl von kugelförmigen Sternhaufen die auf die geschilderte Weise ermittelten Parallaxen. Die erste Kolumne enthält die Nummer des Objektes im „New General Catalogue"

der Sternhaufen und Nebelflecken von Dreyer, die zweite die Nummer im Katalog von Messier.

NGC	Messier	Parallaxe
5272	3	0.000072″
5904	5	80
6205	13	90
6656	22	118
7078	15	68
7089	2	64
5139	—	153
Kl. Magell. Wolke	—	52

Die Magellanschen Wolken sind nicht zu den kugelförmigen Sternhaufen zu rechnen, aber ihr Reichtum an Veränderlichen läßt sie in der gleichen Weise behandeln wie diese. M13 ist der bekannte helle Sternhaufen im Herkules; NGC 5139 ist ω Centauri. Die uns nächsten Sternhaufen sind 47 Tucanae (NGC 104) mit $p = 0.000148''$ und ω Centauri. Beide sind rund 7000 Sternweiten oder 20000 Lichtjahre entfernt. Der entfernteste ist NGC 7006 mit $p = 0.000014'' = 67000$ Sternweiten $= 220000$ Lichtjahren. Fast ebensoweit entfernt sind NGC 4147, 6229, 6235, 6287, 6441, 6864 (Messier 75). Der mittlere Durchmesser dieser Systeme beläuft sich auf rund 500 Lichtjahre. In M3 z. B. würde die Sonne als ein Stern der 21.—22. Größe erscheinen, Sirius als 17. Größe. Die Sterne stehen im Innern des Haufens erheblich dichter als in der Umgebung der Sonne. In einem Kreise um die Mitte des Haufens, dessen Radius der Parallaxe 0.1″ vom Mittelpunkt aus gesehen entsprechen würde, befinden sich mindestens 15000 Sterne, die heller als 20. Größe sind, während die Zahl der Sterne in der Umgebung der Sonne, deren Parallaxe mindestens 0.1″ beträgt, noch nicht 20 beträgt, von denen dazu die meisten so lichtschwach sind, daß sie in dem Sternhaufen weit unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze sein würden. Außerhalb des auf den Photographien zusammengeflossenen mittleren Teiles sind mehr als 20000 Sterne bis unter der 20. Größe gezählt, die einen kreisförmigen Raum von einem Monddurchmesser bedecken. Die Gesamtzahl aller Sterne des Haufens bis zur 20. Größe, die also mindestens 4 mal so hell als die Sonne sind, wird auf 40000 veranschlagt. Ihre Masse ist unter Voraussetzung gleicher Verhältnisse in dem Haufen und im galaktischen System auf 160000 Sonnenmassen zu schätzen. Eine Aufnahme von Ritchey mit dem 60zölligen Mount-Wilson-Reflektor zeigt in M13 27000 Sterne in einem Kreise von 2′ Radius um die Mitte des Haufens. Ein Bild von M 5 gibt Tafel VII.

Die nächsten und entferntesten kugelförmigen Sternhaufen.

Mittlerer Durchmesser.

Sternzahl und Sterndichte.

Das Zentrum des Systems der kugelförmigen Sternhaufen liegt, wie bereits erwähnt, in der Richtung zum Sagittarius, nahe der Grenze zum Skorpion und Ophiuchus. Seine Entfernung ist zu 60000 Lichtjahren anzunehmen. Der größte Durchmesser des ganzen von den kugelförmigen Sternhaufen bevölkerten Raumes beträgt rund 200000 Lichtjahre. Von mindestens dieser Größenordnung muß also auch das gesamte galaktische System sein.

Das Zentrum des Systems der kugelförmigen Sternhaufen.

Über die Gesetze der Verteilung der Sterne im Innern eines kugelförmigen Haufens herrscht noch keine Klarheit, da alles, was wir von diesen Systemen bisher wissen, sich auf die absolut helleren Glieder derselben, im günstigsten Falle bis herab zu etwa Sonnenhelligkeit, bezieht. Verteilungsgesetze, die auf der Abzählung etwa der zweitausend hellsten Sterne eines kugelförmigen Sternhaufens beruhen, können offenbar höchstens für die Riesensterne dieser Systeme Geltung beanspruchen.[127]) Wahrscheinlich reicht aber keine der bisherigen Aufnahmen von kugelförmigen Sternhaufen bis unter die Sonnenhelligkeit, so daß selbst Shapleys, auf den Aufnahmen mit dem 60-zölligen Reflektor des Mount Wilson beruhende Untersuchungen, wie dieser selbst ausdrücklich hervorhebt, nur auf die absolut hellen Sterne dieser Systeme Bezug haben. Diese Aufnahmen sind gewöhnliche photographische und photovisuelle; sie liefern die photographische und die visuelle Helligkeit der Sterne in einem wohldefinierten Helligkeitssystem und damit den Farbenindex als Ersatz für das im allgemeinen nicht feststellbare Spektrum der Einzelsterne. Nur bei einigen der hellsten kugelförmigen Sternhaufen, z. B. bei M 13, waren auch direkte Bestimmungen der Spektren einer kleinen Anzahl Sterne möglich[128]), die zur Kontrolle der Beziehung zwischen Farbenindex und Spektralklasse dienen konnten. Es zeigte sich nun zunächst, daß in den kugelförmigen Sternhaufen nicht die blauesten (heißesten) Sterne im Durchschnitt die größte absolute Helligkeit besitzen, sondern daß ähnlich wie im galaktischen System die absolut hellsten Sterne gelb oder rot, d. h. von fortgeschrittenem Spektraltypus, sind. Ihre Anzahl ist hier wie dort verhältnismäßig klein. Erst bei den schwächeren (absolut immer noch sehr hellen) Sternen beginnen die blauen, die Spektralklassen B und A, zu überwiegen. Vermutlich werden bei den schwächsten Sternen wieder die gelben und roten, jetzt aber Zwerge, vorherrschen, wie dies auch im galaktischen System in der Umgebung der Sonne sowohl wie bei den Milchstraßensternen der Fall ist; aber so weit ist die Forschung bisher nicht vorgedrungen. In den vorhin erwähnten Sternhaufen M 3 und M 13 würden die absolut schwachen Sterne von Sonnenhelligkeit etwa bei der 21. oder 22. Größe beginnen.

Verteilung der Sterne in den kugelförmigen Sternhaufen.

Das häufige Vorkommen von Sternen mit negativen oder sehr kleinen positiven Farbenindices (Spektraltypus B und A) in den kugelförmigen Sternhaufen ist von besonderer Bedeutung. Es beweist nämlich, daß das Licht auf dem ungeheuren Wege von diesen Gebilden bis zu uns keine merkliche selektive Absorption im Weltenraume infolge Molekularzerstreuung erlitten hat. In M 13 z. B. liegen nach Shapley die Farbenindices von 1300 untersuchten Sternen zwischen -0.52^m und $+1.96^m$. Wird das Zentrum des Haufens, in dem die Sterne zu dicht für genaue Untersuchung stehen, ausgeschlossen, so verringert sich die obere Grenze auf $+1.45^m$. Das Maximum der Häufigkeit liegt bei dem Farbenindex $+0.90^m$ bzw. $+0.70^m$ (Spektrum F). Ein zweites Maximum tritt für die blauen Sterne zwischen B und A ein. Ähnlich verhalten sich die Sterne des großen galaktischen

Absorption des Lichtes im Weltraum.

Systems, in dem ebenfalls alle Farbenindices auftreten mit Maxima der Häufigkeit bei den frühen und mittleren Spektralklassen. Betrüge z. B. die Änderung des Farbenindex infolge kosmischer Absorption auch nur 0.00015^m pro Sternweite ($p = 1''$), so könnten in M 13 keine Farbenindices vorkommen, die kleiner als $+ 1^m$ wären. Ähnlich liegen die Verhältnisse für die noch viel weiter entfernten Sternhaufen und für niedrige galaktische Breiten, in denen am ehesten eine Absorption zu erwarten wäre. Man darf also gewiß sein, daß Absorption des Lichtes im Weltraum für die Erforschung des Sternsystems vorläufig keine Rolle spielt. Meteorischer Staub scheint im interstellaren Raum fast völlig zu fehlen.

Farbenindices in kugelförmigen und offenen Sternhaufen.

Das Verhalten der Farbenindices zu den absoluten Helligkeiten in den kugelförmigen Sternhaufen ist durchaus verschieden von dem in den offenen Haufen. In den Plejaden z. B. nehmen die Farbenindices mit abnehmender Helligkeit beständig zu. Das spektrale Verhalten der kugelförmigen Sternhaufen ist bemerkenswert gleichförmig. Fath fand spektrographisch das Gesamtspektrum (das „integrierte" Spektrum) von 9 solchen Systemen nahe identisch und dem Typus F bis G nahestehend. Dieses Spektrum ist wohl als eine Mischung der Spektraltypen der helleren Sterne der Systeme zu betrachten. Einzeluntersuchungen ergaben in M 13 verschiedene Typen, in NGC 7088 und 7089 Typus F vorherrschend. Das integrierte Spektrum der Milchstraße wurde gleich G gefunden.

Effektive Wellenlängen der kugelförmigen Sternhaufen.

Mit der Methode der effektiven Wellenlängen erhielten Hertzsprung, Lundmark und Lindblad Werte, die ebenfalls den Spektralklassen F bis G entsprechen. Die Übereinstimmung der beiden Ergebnisse, von denen das eine auf dem Charakter der Spektrallinien, das andere auf der Energieverteilung im kontinuierlichen Spektrum beruht, spricht auch wieder für das Fehlen einer merklichen Absorption des Lichtes im Weltraum. Merkliche Unterschiede zwischen der Mitte und den äußeren Partien der kugelförmigen Sternhaufen in bezug auf die Verteilung der Farbenindices sind nicht festgestellt worden. Die absoluten Helligkeiten (Massen?) sind in dem mittleren Teile durchschnittlich vielleicht größer als in den äußeren, doch liegt hier die Möglichkeit rein photographischer störender Einflüsse auf die Helligkeitsbestimmungen nahe, so daß die Frage noch nicht als entschieden angesehen werden kann. Hält man sich die vielen übereinstimmenden Eigenschaften der kugelförmigen Sternhaufen vor Augen: die gleiche räumliche Anordnung der Sterne, den geringen Spielraum in den wahren Durchmessern, die Ähnlichkeit der Verteilung der Sterne nach Helligkeit und Farbe, die Gleichheit des Gesamtspektrums usw., so muß man zu dem Schluß gelangen, daß diese Systeme nur unter ganz bestimmten, eng begrenzten Bedingungen ihre Existenz behaupten können. In einigen wenigen Fällen (NGC 5466, 6366, 7492) haben sich in bezug auf die Verteilung der Helligkeiten und Farben Anomalien ergeben; in diesen ist aber auch zugleich eine stärkere Zerstreuung der Sterne als gewöhnlich vorhanden. Vielleicht hat man hier eine spätere Entwicklungsstufe oder gestörte Entwicklungsbedingungen vor sich.[129])

Beschränkte Existenzbedingungen für die kugelförmigen Systeme.

Eine Frage von besonderem Interesse erhebt sich angesichts der großen Unterschiede der Entfernungen der kugelförmigen Sternhaufen. Der Unterschied der Entfernungen beträgt für die nächsten und entferntesten rund 200 000 Lichtjahre. Wir beobachten also, wenn sie alle zur gleichen Zeit entstanden wären, die entferntesten dieser Systeme in einem Entwicklungsstadium, das gegenüber dem der nächsten um 200 000 Jahre zurückliegt. Es hat sich indessen bisher keine Abhängigkeit der physikalischen und mechanischen Struktur von der Parallaxe ergeben. Offenbar spielen 200 000 Jahre im Leben dieser Systeme keine andere Rolle als ein Tag im Menschenleben. Hierin liegt ein schwerwiegendes Argument gegen die Kontraktionstheorie der Sternentwicklung, die viel kürzere Entwicklungszeiträume verlangt, als sich aus dieser Beobachtungstatsache ergeben müssen. Lebensdauer derselben.

Es soll nun noch etwas näher auf Einzelfragen eingegangen werden. Zunächst interessiert die Frage der Abhängigkeit der räumlichen Verteilung der Sterne in den kugelförmigen Haufen von Helligkeit und Farbe. Hier haben sich mit dem Vordringen der Forschung zu den schwächeren Sternen merkwürdige, an die Verhältnisse in unserem engeren Sternsystem erinnernde Tatsachen ergeben. Während die absolut sehr hellen gelben und roten Sterne in der Regel über den ganzen Haufen gleichmäßig verteilt sind, zeigen die schwächeren Sterne und die kurzperiodischen δ Cephei-Sterne häufig eine elliptische oder scheibenförmige Anordnung, wie sie stattfinden müßte, wenn das System abgeplattet wäre und unter einem von Null verschiedenen Winkel gegen die kleine Achse betrachtet würde. Mitunter ist die elliptische Verteilung auch schon bei den hellsten Sternen angedeutet. Bei M 13 dagegen ergab sich die Symmetrieachse erst deutlich, wenn etwa 30 000 schwächere Sterne in Betracht gezogen wurden. Sternhaufen mit merklich elliptischer Figur und Anordnung sind u. a. ω Centauri, M 19 (!), M 13, M 2, M 56, M 15, M 10. Die scheinbar kreisförmigen Sternhaufen (z. B. NGC 6218, 6779), die entweder streng kugelige sind oder aber deren „galaktische Ebenen" senkrecht auf der Gesichtslinie stehen, erscheinen in der Regel weniger stark verdichtet als die elliptischen. Dies ist ja von vornherein zu erwarten, wenn die zweite Möglichkeit der Wirklichkeit entspricht. Die Sternhaufen M 3 und M 62 sind merklich asymmetrisch gebaut. In dem stark abgeplatteten galaktischen System zeigen die δ Cephei-Sterne mit längerer Periode (> 1 Tag) eine starke Konzentration gegen die Milchstraße, ebenso die Sterne der frühen Spektralklassen, während die δ Cephei-Sterne mit sehr kurzer Periode (die Antalgolsterne, die den kurzperiodischen Sternhaufenveränderlichen entsprechen) und die gelben und roten Giganten die Milchstraße eher meiden als bevorzugen. Indessen sind für das galaktische System die Beobachtungsbelege besonders bezüglich der Antalgolsterne noch sehr unvollständig. Weiteres zur Verteilung der Sterne in den kugelförmigen Sternhaufen.

Die Abplattung der Sternhaufen ist weit geringer als die des galaktischen Systems oder gar der Spiralnebel. Die Symmetrieachsen zeigen bei den näheren Sternhaufen eine deutliche Abhängigkeit von der Milchstraße; Lage der Symmetrieachsen in bezug auf die Milchstraße.

sie sind fast ausnahmslos parallel dem Zuge der Milchstraße, was vielleicht auf Parallelismus der galaktischen Ebenen der näheren (also auch der Ebene der Milchstraße näheren!) kugelförmigen Sternhaufen mit der Ebene der Milchstraße hinweist. Bei den entfernteren Haufen dagegen liegt jedenfalls eine Verteilung der Achsen nach dem Zufall vor. Die galaktische Ebene von M 22, der der Ebene der Milchstraße am nächsten steht, scheint dieser parallel zu sein.

Innere Bewegungen.

Innere Bewegungen sind bisher noch bei keinem kugelförmigen Sternhaufen mit Sicherheit nachgewiesen worden, trotzdem gerade dieser Frage von Anfang an das Interesse der Astronomen besonders gewidmet war. Es liegen sorgfältige photographische Ausmessungen einer Anzahl von Systemen vor[130]), von denen einige jetzt bereits mehrere Male zu verschiedenen Zeiten untersucht worden sind. Aber offenbar sind die von den Beobachtungen bedeckten Zeiträume noch zu kurz, um die kleinen relativen Bewegungen der Komponenten dieser Systeme aufzudecken. Dies ist bemerkenswert, da es bei den wahrscheinlich noch weiter entfernten Spiralnebeln anscheinend gelungen ist, interne Bewegungen nachzuweisen.

Radialgeschwindigkeiten der kugelförmigen Sternhaufen.

Günstiger ist das Ergebnis der spektrographischen Untersuchungen der Systembewegungen in der Gesichtslinie gewesen. Im vorigen sind bereits allgemeine Angaben über die Radialgeschwindigkeiten der kugelförmigen Sternhaufen gemacht worden, die hier nach Sliphers Beobachtungen[131]) mit einigen Zahlen belegt werden sollen:

NGC	Messier	Radialgeschwindigkeit	Galaktische Breite
5024	53	— 170 km	+ 79°
5272	3	— 125	+ 77
5904	5	+ 10	+ 45
6205	13	— 300	+ 40
6333	9	+ 225	+ 9
6341	92	— 160	+ 34
6626	28	0	— 7
6934	—	— 350	— 20
7078	15	— 95	— 29
7089	2	— 10	— 37
Gr. Magell. Wolke	—	+ 260 km	— 32
Kl. „ „	—	+ 150	— 44

Die beiden Magellanschen Wolken sind nur zum Vergleich hinzugesetzt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit ist demnach eine sehr hohe. Auffallend ist das Vorwiegen des negativen Vorzeichens, das früher bereits interpretiert wurde. Eine Ausnahme bilden scheinbar M 5 und M 9. Der Wert für M 5 liegt jedoch innerhalb der Grenzen seiner Unsicherheit, und M 9 hat eine so geringe galaktische Breite, daß die Radialgeschwindigkeit kein Urteil über die Richtung der Bewegung senkrecht zur Milchstraße erlaubt. Über die sphärischen Eigenbewegungen ist noch nichts Sicheres ermittelt.

Veränderliche in kugelförmigen Sternhaufen.

Eine der merkwürdigsten und rätselhaftesten Erscheinungen, die die kugelförmigen Sternhaufen darbieten, sind die in einigen von ihnen in über-

raschend großer Zahl vorhandenen Veränderlichen vom δ Cephei-Typus, und zwar ganz überwiegend der kurzperiodischen Abart, die in der Einteilung der Veränderlichen mit „Antalgolsterne" oder „Sternhaufenveränderliche" bezeichnet wurde. Bailey ist auf diese Tatsache zuerst aufmerksam geworden.[182]) Jedoch beschränkt sich diese Erscheinung nicht auf die kugelförmigen Systeme, indem von Leavitt auch in den beiden Magellanschen Wolken eine enorme Zahl dieser Veränderlichen gefunden wurde. Die beiden Sternwolken ähneln, wie in so mancher anderen Beziehung, auch in dieser dem großen galaktischen System, in dem bekanntlich ebenfalls eine große Zahl von δ Cephei-Veränderlichen aller Arten vorkommt.

Die Zahl der bisher bekannten Veränderlichen beträgt in den beiden Magellanschen Wolken nahezu 1800, in ω Centauri 128, in M 3 mehr als 150, in M 5 etwa 100, in M 15 mehr als 50, in M 13 dagegen bisher nur 7. Im ganzen sind bisher in 26 kugelförmigen Sternhaufen Veränderliche gefunden worden. Diese Veränderlichen sind erst zu einem Teil genauer untersucht, doch genügen die vorhandenen Belege zur Aufdeckung einer Reihe interessanter Tatsachen. Die von Leavitt bei den Veränderlichen der kleinen Magellanschen Wolke gefundene Abhängigkeit der Periodenlänge von der absoluten Helligkeit ist bereits erwähnt worden. Diese Abhängigkeit gilt nur für die Veränderlichen mit Perioden über 1 Tag. Für die kürzeren Perioden wird die absolute Helligkeit nahezu konstant (-0.23^m photographisch). Die folgende Zusammenstellung veranschaulicht diese Beziehung für die kleine Magellansche Wolke: Periodenlänge und absolute Helligkeit.

log P	Mittl. scheinb. visuelle	Mittl. absolute Helligkeit	Zahl d. Sterne	log P	Mittl. scheinb. visuelle	Mittl. absolute Helligkeit	Zahl d. Sterne
0.098	15.2^m	-1.2^m	1	0.899	13.6^m	-2.8^m	2
0.247	15.3	— 1.1	3	1.040	13.2	— 3.2	2
0.337	14.9	— 1.5	1	1.113	12.9	— 3.5	3
0.464	14.6	— 1.8	1	1.224	12.6	— 3.8	2
0.545	14.8	— 1.6	1	1.504	11.6	— 4.8	1
0.645	14.5	— 1.9	2	1.818	10.1	— 6.3	1
0.717	14.3	— 2.1	3	2.104	9.6	— 6.8	1
0.811	13.7	— 2.7	2				

Mit vielleicht einer Ausnahme ist kein Veränderlicher in der Wolke bekannt, dessen Helligkeitsmaximum schwächer als 16.0^m visuell ist. Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse bei M 3, M 5 und anderen kugelförmigen Sternhaufen. Bei allen ist eine bestimmte Grenze der absoluten Helligkeit, des Spektrums, der Periode vorhanden, über die hinaus δ Cephei-Veränderlichkeit nicht mehr auftritt. Bedeckungsveränderliche sind bisher in den kugelförmigen Sternhaufen nicht gefunden worden, dagegen langperiodische in einzelnen Fällen. Alle übrigen gehören zum δ Cephei-Typus und haben ganz überwiegend Perioden kleiner als 1 Tag. Unter diesen hat Bailey mehrere Unterklassen festgestellt, die sich durch Periodenlänge, Amplitude und Form der Lichtkurve unterscheiden. So zerfallen die Veränderlichen in ω Centauri in die drei Unterklassen: Untere Helligkeitsgrenze. Unterklassen.

Unterklasse	Mittl. Periode	Mittl. Ampl.	Mittl. Helligk.	Mittl. Max.	Zahl der Sterne
a	0.586^d	1.11^m	13.55^m	12.99^m	33
b	0.752	0.87	13.55	13.10	15
c	0.395	0.56	13.61	13.33	28

Farbenindex.

Die mittleren scheinbaren und absoluten Helligkeiten der drei Unterklassen sind also gleich; dasselbe gilt für die Farbenindices. In M 15 wurden zwei Unterklassen gefunden, deren mittlere Periode 0.64^d und 0.36^d beträgt. Die erstere Klasse ist im Maximum der Helligkeit vielleicht etwas röter als die letztere. Die mittleren Farbenindices sind aber auch hier nahezu gleich. Die Klasse, deren mittlere Periode einem halben Tag am nächsten kommt, entspricht in der Form der Lichtkurve den isolierten Antalgolsternen des galaktischen Systems, die ebenfalls bei $P = {}^1/_2{}^d$ ein Häufigkeitsmaximum zeigen. Bei den anderen Klassen ist die Helligkeitsbewegung gleichmäßiger. In M 3 sind alle bisher gefundenen Lichtkurven gleicher Art, und es findet ein schwacher Gang der Helligkeit mit der Amplitude statt: die Helligkeit nimmt von 15.6^m auf 15.4^m zu, während die Amplitude von 1.0^m auf 1.5^m wächst. Das physikalische Verhalten der Sternhaufenveränderlichen entspricht im allgemeinen sehr nahe dem der isolierten δ Cephei-Sterne; die Farbe ist im Maximum der Helligkeit weißer als im Minimum, die photographische Amplitude daher größer als die visuelle. Merkwürdig ist nach Shapley das Verhalten des violetten Farbenindex (mit einem Violettfilter erhalten) in dem Sternhaufen M 15; es ist das umgekehrte wie das des photographischen, so daß also die violette Amplitude kleiner, als die visuelle sein sollte. Dies steht ganz im Gegensatz zu dem Verhalten des violetten Farbenindex der unveränderlichen Giganten desselben Systems, der mit der Helligkeit wie der gewöhnliche Farbenindex verläuft, d. h. zunimmt, wenn die Helligkeit zunimmt. Dies verlangt noch weitere Untersuchungen, auch an den isolierten Veränderlichen vom δ Cephei-Typus. In M 5 und dann auch in anderen Systemen fand Bailey neuerdings eine weitere Abart von Sternhaufenveränderlichen, die sich durch doppelte Maxima und Minima auszeichnet. Die halben Perioden liegen zwischen 0.23^d und 0.36^d, im Durchschnitt betragen sie 0.271^d. Die ganzen Perioden schließen sich den Durchschnittswerten für die Unterklasse a (in ω Centauri 0.549^d, in M 3 0.541^d, in M 5 0.547^d) eng an. Man sieht übrigens an diesen Zahlen, wie außerordentlich gleichförmig diese Veränderlichen in den verschiedenen Sternhaufen beschaffen sein müssen. Gleiches gilt für die Form der Lichtkurve, die Amplitude, den Farbenindex und vor allem für die mittlere Helligkeit. Die mittlere Helligkeit von 110 genauer untersuchten Veränderlichen mit Perioden unter 1 Tag in M 3 beträgt 15.50^m, und die mittlere Abweichung eines Sternes nur $\pm 0.08^m$, die größte Abweichung bleibt unter 0.2^m. Dabei streuen die Helligkeiten der unveränderlichen Sterne des Haufens über mindestens 9^m—10^m. Unter 20000 Sternen, die schwächer als die Veränderlichen sind, wurde kein einziger Veränderlicher gefunden. Die Veränderlichkeit ist also an einen

Verhalten des violetten Farbenindex.

Veränderliche mit zwei Maxima und Minima.

Geringe Streuung der absoluten Helligkeiten der typischen Sternhaufenveränderlichen.

ganz bestimmten engen Helligkeitsbereich gebunden. Dasselbe gilt für M 5, M 15, ω Centauri. Ähnliches ist bisher für die verwandten Veränderlichen im galaktischen System nicht festgestellt und auch kaum wahrscheinlich.

Ein kritisches Stadium in der Entwicklung der Sterne.

Alles dies spricht dafür, daß die Veränderlichkeit der Sternhaufensterne nur in einem ganz bestimmten Entwicklungsstadium möglich ist, das durch die absolute photographische Helligkeit -0.23^m gekennzeichnet wird. Diese Helligkeit in der Helligkeitsfolge, die ein Sternhaufenstern im Verlauf seiner Entwicklung durchmacht, ist offenbar, wie Shapley sich ausdrückt, eine „kritische". Sie tritt im Sinne der Riesen- und Zwergen-Theorie am blauen Ende der Riesenreihe ein, also nahe dem Gipfel der Entwicklungskurve, wo die Temperatur aufhört, noch weiter zuzunehmen, um dann allmählich in die Abnahme überzugehen. An diesem Punkte der Entwicklung ändern sich vielleicht die physikalischen Bedingungen im Innern der gasförmigen Massen durchgreifend. Im Zusammenhang mit dieser Frage ist es bemerkenswert, daß der an Veränderlichen so reiche Sternhaufen M 3 arm an blauen Sternen der mittleren Helligkeit -0.2^m, dagegen der an Veränderlichen arme M 13 reich an blauen Sternen ist.

Bedenken gegen Shapleys Voraussetzung homogener physikalischer Beschaffenheit des Universums.

Befremdend und bedenklich für die Gültigkeit der Voraussetzung von Shapleys Untersuchungen über die kugelförmigen Systeme (S. 466) ist das völlige Fehlen von Bedeckungsveränderlichen in diesen Systemen. Auch die meisten anderen Arten von Veränderlichen sind bisher noch nicht nachgewiesen. Dies scheint darauf hinzudeuten, daß doch eine wesentliche Verschiedenheit zwischen den Sternen in der Umgebung der Sonne und den Sternhaufensternen besteht. Auch daß in den kugelförmigen Sternhaufen niemals Nebelmaterie nachweisbar ist, sehr im Gegensatz zur Milchstraße und den offenen Sternhaufen, ist wohl nicht ohne tiefere Bedeutung. Diese Bedenken berühren jedoch weniger die Brauchbarkeit der Shapleyschen Methode als die Zuverlässigkeit der mit ihr erlangten absoluten Zahlenwerte.

Die offenen Sternhaufen.

Die offenen Sternhaufen sind weit weniger erforscht als die kugelförmigen. Wie schon ihr Name ausdrückt, sind die Sterne in ihnen weniger dicht gedrängt, besonders auch nimmt die Sterndichte nicht gegen die Mitte hin so stark zu wie bei jenen. Ob sie wesentlich verschieden von den zerstreuten Haufen mit merklicher gemeinschaftlicher Eigenbewegung der Komponenten, oder ob sie nur weiter von uns entfernt als diese sind, ist noch eine unbeantwortete Frage. Es scheint, daß die Verschiedenheit ihrer Entfernung oder ihrer galaktischen Stellung den wesentlichsten Unterschied ausmacht. Jedenfalls, physikalische Unterschiede, wie sie zwischen den offenen Sternhaufen und den typischen kugelförmigen in so ausgeprägter Weise bestehen, sind zwischen den offenen und den bewegten bisher nicht bekannt geworden.

Offene und bewegte Systeme.

Galaktische Verteilung der offenen Sternhaufen.

Im Gegensatz zu den kugelförmigen Sternhaufen weisen, wie schon erwähnt, die offenen Systeme ein scharfes Häufigkeitsmaximum in der Milchstraße auf. Gerade in der Mittelzone, wo erstere ganz fehlen, sind sie am stärksten vertreten. Aber sie treten auch außerhalb dieser Mittelzone auf und

sind im ganzen symmetrisch zur Achse der Milchstraße verteilt. In den Magellanschen Wolken sind sie ebenfalls häufig. Vielleicht wird man bei vollständigerer Kenntnis der offenen Sternhaufen alle möglichen Übergänge zu den kugelförmigen finden. Da für die offenen Systeme die Anhaltspunkte zur Bestimmung ihrer Entfernungen, wie Sterne bekannter durchschnittlicher absoluter Helligkeit, geringer Spielraum ihrer Dimension usw. bisher nicht hinreichend vollständig untersucht sind, so sind gerade die wichtigsten Fragen, die nach der Entfernung und den Dimensionen, noch nicht befriedigend beantwortet. Ansätze zu ihrer Beantwortung sind besonders von Hertzsprung, Shapley und Seares[133]) gemacht worden. Aus diesen Untersuchungen scheint hervorzugehen, daß die räumlichen Dimensionen der offenen Sternhaufen denen der kugelförmigen nicht nachstehen. Für 70 solcher Systeme gehen die Entfernungen nach Shapley von 400 bis 16000 Sternweiten mit einem Durchschnitt von 5900. Ein offener Haufen, die Plejaden, ist uns viel näher als die übrigen; seine Entfernung scheint etwa 70 Sternweiten zu betragen. An Sternreichtum können sie sich mit den kugelförmigen Systemen nicht messen. Ihre Formen sind sehr mannigfaltig, regelmäßig oder unregelmäßig, scharf begrenzt oder unbestimmt, die Sterne ziemlich dicht gedrängt oder auch grob zerstreut. Während in den kugelförmigen Systemen niemals Nebelmaterie nachgewiesen werden konnte, ist sie in den offenen nicht selten. Die Komponenten der offenen Systeme gehören teils den verschiedensten Spektralklassen an, teils überwiegend einer bestimmten Spektralklasse. Wesentlich verschieden ist das Verhalten des Spektraltypus oder des Farbenindex zur absoluten Helligkeit, das in den kugelförmigen Systemen so gleichförmig gefunden wird.

Parallaxen und Dimensionen.

Eigenschaften der offenen Systeme.

In dem von Hertzsprung, Seares und Shapley untersuchten System NGC 1647, das nicht weit von der Milchstraße entfernt ist, zeigt sich keine Abhängigkeit der räumlichen Sternverteilung von der Farbe, dagegen ist die Verdichtung nach der Mitte für die helleren Sterne ausgeprägter, während sie bei den schwächeren für alle Größen gleich ist. Das Häufigkeitsmaximum tritt für die verschiedenen Farbenklassen bei verschiedener Helligkeit ein; letztere nimmt um 2^m ab, wenn der Farbenindex um 1^m zunimmt. Dies erklärt vielleicht den geringen beobachteten Prozentsatz von gelben und roten Sternen in diesem Haufen. Ähnlich verhält sich der von Seares und Shapley untersuchte M 67, der 34^0 von der Milchstraße absteht, nur ist die Beziehung zwischen Farbe und Helligkeit weniger ausgeprägt. Im ersteren Falle ist der Prozentsatz der verschiedenen Farben ein merklich anderer als bei den Sternen des Himmelsgrundes in der Umgebung, im letzteren unterscheidet er sich nicht wesentlich davon, so daß M 67 als eine bloße Verdichtung der Feldsterne betrachtet werden kann. Unter sich unterscheiden sich die beiden Haufen noch insofern, als in NGC 1647 eine beträchtliche Zahl von blauen Sternen und nur sehr wenige gelbe und rote Sterne vorhanden sind, während M 67 keine blauen und roten, dagegen sehr viele gelbe Sterne enthält. Das Fehlen der roten Sterne in beiden Systemen kann na-

Die offenen Sternhaufen NGC 1647, M 67 und M 11.

türlich durch die geringe Helligkeit derselben verursacht und dann ein nur scheinbares sein. Der in einer galaktischen Wolke stehende und zweifellos mit dieser zusammenhängende offene Sternhaufen M 11 besteht nach Shapley vorwiegend aus Sternen vom Spektraltypus A—F. Der eigentliche Haufen enthält wahrscheinlich nicht mehr als 200 Sterne auf einem Areal von 5′ Durchmesser. Der Farbenindex der Sterne der Wolke ist kaum merklich von der Helligkeit abhängig. Der Haufen unterscheidet sich physikalisch nicht von der übrigen Wolke. Bemerkenswert ist die Häufigkeit kleiner Farbenindices unter den schwachen Sternen (14^m—15^m) der Wolke. Dagegen findet in den Plejaden, wie bereits kurz erwähnt, ein ausgesprochener Gang der Farbe mit der Helligkeit statt in dem Sinne, daß der Farbenindex um so größer wird, je geringer die Helligkeit ist.[134]) Dieses Verhalten fand man auch bei anderen offenen Systemen, insbesondere aber bei den bewegten, zu denen die Plejaden ebensogut wie zu den vorstehenden gerechnet werden können.

Die bewegten Systeme.

Über die bewegten Systeme, als deren Repräsentant die bekannte Hyadengruppe gelten kann, ist in physikalischer Hinsicht nichts zu sagen, was nicht bereits im vorstehenden zur Sprache gekommen ist, da sie sich nicht wesentlich von den übrigen offenen Sternhaufen unterscheiden. Das Hauptinteresse konzentriert sich bei ihnen auf die Erforschung ihrer Eigenbewegung, die es ermöglicht hat, die Entfernung und räumliche Anordnung dieser Sterngruppen mit einem hohen Grade von Sicherheit zu ermitteln. Jedoch gehört dies nicht in diesen Abschnitt. (Siehe S. 550 f.)

Die Spiralnebel.

Die Spiralnebel stehen den kugelförmigen Sternhaufen in spektraler Hinsicht nahe; sie besitzen wie diese ein im wesentlichen kontinuierliches Spektrum. Auch in ihrer galaktischen Verteilung und in ihren Bewegungsverhältnissen zeigen sie trotz aller Verschiedenheit gewisse Analogien zu ihnen. Aber während man über die Zugehörigkeit der kugelförmigen Sternhaufen zum großen galaktischen System kaum noch im Zweifel sein kann,

Die kosmische Stellung der Spiralnebel.

steht sie für die Spiralnebel noch nicht so fest. In der Tat sind bezüglich der kosmischen Stellung der Spiralnebel die Meinungen der Astronomen noch sehr geteilt. Betrachtet man sie gemäß der Aussage des Spektrums als riesige Sternansammlungen, so führt der Umstand, daß noch bei keinem dieser Gebilde eine direkte Auflösung in Sterne gelungen ist, notwendig zu dem Schluß, daß sie noch sehr viel weiter entfernt sein müssen als selbst die entferntesten Sternhaufen, und es erhebt sich dann die Frage, ob sie nicht als unserem galaktischen Systeme koordinierte Einheiten, als andere Milchstraßen von ähnlicher Ausdehnung und Struktur wie die uns umgebende, betrachtet werden müssen. Gegen diese letztere Auffassung indessen spricht doch manches, wie man aus dem folgenden erkennen wird, wenn auch von einer endgültigen Entscheidung keineswegs die Rede sein kann. Man darf auch nicht übersehen, daß die Zusammensetzung der Spiralnebel aus Sternen, die denen des galaktischen Systems an Größe, Masse, Leuchtkraft usw. vergleichbar sind, zwar sehr wahrscheinlich, aber doch keineswegs bereits bewiesen ist. Es bleibt immer noch die Möglichkeit offen, daß

in ihnen die Materie in einem anderen Zustande — etwa in einem mehr staub- oder meteoritenartigen — sich befindet als in unserem Sternsystem. Dann gilt aber offenbar der obige Schluß auf ihre Entfernungen nicht und auch die später zu betrachtende Abschätzung der Parallaxe aus der Helligkeit der Novae in Spiralnebeln kann dann zu gänzlich unrichtigen Ergebnissen führen.

Zahl der Spiralnebel.

Die Zahl der Spiralnebel ist eine enorm große. Perrine schätzt, daß mit dem 60-zölligen Reflektor der Mt. Wilson-Sternwarte bei einstündiger Belichtung am ganzen Himmel 160000 Spiralnebel sichtbar gemacht werden könnten. H. D. Curtis schätzt die Zahl der mit dem 36-zölligen Crossley-Reflektor der Licksternwarte erreichbaren unter Berücksichtigung gewisser Umstände sogar auf 700000 bis über eine Million, während Keeler sie früher für dasselbe Instrument auf 120000 veranschlagte.[135])

Galaktische Verteilung.

Die galaktische Verteilung der Spiralnebel ist eine sehr merkwürdige' besonders wenn sie mit der Verteilung ihrer durchschnittlich überaus großen Radialgeschwindigkeiten verglichen wird. Sie vermeiden die Milchstraße bis zu großem Abstande und sind am häufigsten in der Umgebung des Nordpoles derselben (Coma Berenices), wo z. B. Wolf auf kleiner Fläche ihrer 450 fand. Sie kommen der Milchstraße am nächsten in der Rektaszension 2^h, und bleiben ihr in 14^h am fernsten. Die kugelförmigen Sternhaufen verhalten sich gerade umgekehrt. Auch die räumliche Verteilung und die vorherrschende Bewegungsrichtung der beiden Gebilde ist eine gegensätzliche. Auffallend ist die unsymmetrische Verteilung der Spiralnebel in bezug auf die Milchstraßenachse; sie sind auf der nördlichen Seite der Michstraße weit

Drift der Spiralnebel.

häufiger als auf der südlichen. Nach Sliphers Untersuchungen der Radialgeschwindigkeit einer Anzahl hellerer Spiralnebel entfernen sich im Durchschnitt die nördlich von der Milchstraße stehenden Spiralnebel mit großer Geschwindigkeit, während die südlichen sich im Durchschnitt vielleicht uns nähern. Das System der Spiralnebel würde dann also das galaktische System mit großer Geschwindigkeit von Süden nach Norden durchqueren und bereits zu seinem größten Teil die Ebene der Milchstraße passiert haben. Man kann aber auch umgekehrt an eine von Norden nach Süden gerichtete Bewegung der Milchstraße gegen das System der Spiralnebel denken.[136]) Eine andere Auffassung hat Shapley gewonnen, der die vorwiegend positiven Geschwindigkeiten dahin interpretiert, daß die Spiralnebel sich mit großer Schnelligkeit von der Ebene der Milchstraße entfernen, vielleicht unter dem Einfluß einer Repulsivkraft. Dies setzt voraus, daß die physikalische Konstitution der Spiralnebel eine gänzlich andere ist als die der kugelförmigen Sternhaufen, die ja der Milchstraße sich nähern.

Mannigfaltigkeit der Formen der Spiralnebel. Gemeinsame Züge.

Die Mannigfaltigkeit der Formen der Spiralnebel wird zu einem großen Teil durch die Verschiedenheit der Neigungen ihrer Ebenen gegen die Gesichtslinie verursacht. Man kennt ganz offene, fast kreisförmige Spiralen, auf deren Ebenen wir offenbar nahezu senkrecht sehen, und schmale Spindeln oder Schneiden, in denen keine Spur von spiraligen Windungen mehr

zu erkennen ist, die aber ihrem ganzen physikalischen Verhalten nach zu den Spiralnebeln zu rechnen sind. Bei ihnen sehen wir also gerade gegen die Kante. Bei den offenen Spiralen ist eine sehr bemerkenswerte gemeinsame Eigenschaft festzustellen. Stets ist ein soliderer, lichtstärkerer Kern vorhanden, von dem in den meisten (allen?) Fällen zwei und nur zwei Spiralarme aus diametralen Punkten ausgehen. Diese Spiralarme winden sich nicht selten in mehr als einer Windung um den Kern herum, wobei sie sich häufig noch verzweigen, in anderen Fällen sind sie fast abgewickelt und nur schwach gekrümmt. Im Kern und noch mehr in den Spiralarmen bemerkt man häufig Verdichtungen oder Knoten, deren Zahl zuweilen außerordentlich groß ist und in die Tausende geht. Nicht immer sind die Spiralen vollkommen ausgebildet, sondern es finden Unregelmäßigkeiten, Verwerfungen, Knickungen usw. statt. In einzelnen Fällen, z. B. in dem bekannten Spiralnebel in den Jagdhunden M 51, endet ein Spiralarm in einer Nebelmasse, die an Größe, Ausdehnung und Form dem Hauptkern vergleichbar ist. Auf der Verschiedenheit der Feinstruktur ist eine äußerliche Einteilung der Spiralnebel in zwei Klassen gegründet worden, in solche, deren Nebelmaterie wolkig und strukturlos erscheint, mit verwaschenem, nach der Mitte an Helligkeit stark zunehmendem Kern (Andromedanebel), und in solche, deren nebelige Materie in kleine helle Knoten verdichtet ist, so daß sie ein granuliertes Aussehen erhält (M 33). In der zweiten Klasse erscheint der Kern ebenfalls granuliert und schärfer begrenzt als in der ersten. Beide Typen können in ein und demselben Nebel vereinigt sein, der zweite dann aber stets in den vom Kern am weitesten entfernten Teilen.[137]) Ob dieser Einteilung eine tiefere Berechtigung zukommt, kann heute noch nicht gesagt werden, da sie auf physikalische oder andere Unterschiede, die mit ihr verbunden sind, bisher noch nicht geprüft worden ist. Von der Pahlen und L. Becker haben versucht, für die Spiralen mathematische Formeln aufzustellen, die den Verlauf derselben darstellen. Nach ersterem sind die Spiralnebel M 33, M 74, M 51 durch logarithmische Spiralen darstellbar. Letzterer untersuchte M 51, dessen beide Spiralarme er nahezu identisch und durch $r_p = a + bl^2$ darstellbar fand, worin r_p den Radiusvektor in der wahren Spirale, l die Länge in derselben, a und b Konstanten bedeuten. Die Neigung der Spiralenebene gegen die Gesichtslinie ergab sich zu 42^0.[138])

Einteilung der Spiralnebel.

Mathematische Darstellung der Spiralwindungen.

Eine sehr merkwürdige Erscheinung wird häufig bei denjenigen Spiralnebeln beobachtet, deren Ebene mit der Gesichtslinie einen sehr kleinen Winkel bildet. Der spindel- oder schneidenförmige Nebel ist dann seiner ganzen Längsrichtung nach durch einen scharfen dunklen Querstrich gespalten. Man nimmt an, daß dies die Wirkung nichtleuchtender, absorbierender Materie in den äußeren Teilen des Nebels ist.

Absorption in den Spiralnebeln.

Daß die Spiralnebel nicht gasförmig sein können, geht, wie schon erwähnt, aus ihrem Spektrum hervor, das ein kontinuierliches mit Absorptionslinien ist. Nach eingehenden Untersuchungen von Wolf scheinen in einzelnen Spiralnebeln, z. B. im Andromedanebel und in M 51, auch schwache

Spektrum der Spiralnebel.

Emissionen aufzutreten, die den Emissionsbändern der O-Sterne, z. T. vielleicht auch bekannten Gasnebellinien, entsprechen. Fath fand unter weniger günstigen Bedingungen (kleinere Dispersion) das Emissionsband 4060 der O-Sterne in NGC 4736 (M 94) und helle Nebellinien in NGC 1068. Der Gesamtspektraltypus liegt für sämtliche bisher untersuchte Spiralnebel zwischen den Spektralklassen F 5 und K, scheint also ein Mischtypus aus den Spektren der helleren Sterne der Nebel zu sein.[139]) Einige Gasnebel mit spiraliger Struktur dürften wohl nicht zu den eigentlichen Spiralnebeln zu rechnen sein, sondern zu den im folgenden betrachteten planetarischen Nebeln.

Farbenindex, effektive Wellenlänge. Die Windungen sind blauer als der Kern.

Untersuchungen über den Farbenindex und die effektive Wellenlänge von Spiralnebeln[140]) haben Seares bzw. Lundmark und Lindblad ausgeführt. Seares vergleicht gewöhnliche und photovisuelle Aufnahmen von M 51, M 94 und M 99 miteinander und findet, daß die Nebelknoten in den Spiralarmen starke negative Farbenindices haben, während die Zentralkerne, und in M 51 auch der zweite Kern am Ende des einen Spiralarmes, positive Farbenindices aufweisen. Die von Lundmark und Lindblad erhaltenen effektiven Wellenlängen bestätigen im wesentlichen Wolfs und Faths spektrographische Ergebnisse. In dem Nebel M 94 wurde in Übereinstimmung mit Seares der Kern gelber als die Arme gefunden.

Radialbewegung.

Bei weitem das größte Interesse ziehen heute die äußeren und inneren Bewegungsverhältnisse der Spiralnebel auf sich, die der Spektrograph in Verbindung mit den lichtstarken Instrumenten der Gegenwart enthüllt hat. An der Erforschung derselben sind Wolf, Slipher, Pease, Adams und Wright beteiligt.[141]) Die Spiralnebel durchziehen nach den Ergebnissen dieser mühevollen Untersuchungen mit enormen Geschwindigkeiten den Raum, wie aus der folgenden kleinen Zusammenstellung Shapleys hervorgeht.

NGC	Messier	Radialgeschw.	NGC	Messier	Radialgeschw.
224	31	— 316 km	4526	—	+ 580 km
598	33	— 70	4565	—	+ 1100
1023	—	+ 300	4594	—	+ 1180
1068	77	+ 1120	4649	60	+ 1090
2683	—	+ 400	4736	94	+ 290
3031	81	— 30	4826	64	+ 150
3115	—	+ 600	5005	—	+ 900
3379	—	+ 810	5055	63	+ 450
3521	—	+ 730	5194	51	+ 270
3623	65	+ 800	5236	83	+ 500
3627	66	+ 650	5866	—	+ 650
4151	—	+ 940	7331	—	+ 500
4258	—	+ 500			

Es kann also von einer gleichmäßigen Verteilung der Geschwindigkeiten nicht die Rede sein, sondern das positive Vorzeichen überwiegt ganz auffallend. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Spiralnebel ist etwa 25-

Innere Bewegung.

mal größer als für Sterne aller Gattungen. Neben diesen Gesamtbewegungen hat man in einzelnen Fällen auch innere Bewegungen feststellen können, die

zunächst als eine Rotation in der Ebene der Spiralen aufgefaßt werden können. Eine solche Art von innerer Bewegung war ja nach dem Aussehen der Spiralnebel von vornherein zu erwarten. Die erste Feststellung dieser Art gelang Wolf an M 81. Die Rotationsgeschwindigkeit beträgt rund 100 km/sec; die Ostseite des Nebels kommt auf uns zu. Eingehendere Untersuchungen mit lichtstärkeren Instrumenten wurden dann von Slipher und von Pease ausgeführt. Es ergaben sich z. B. für den Andromedanebel und den Nebel NGC 4594 die Geschwindigkeitsformeln: $y = -0.48x - 316$ km bzw. $y = -2.78x + 1180$ km, worin y die Radialgeschwindigkeit im Abstande x (in Bogensekunden) vom Zentrum des Nebels längs der großen Achse bedeutet. Im Andromedanebel beträgt die Radialgeschwindigkeit 2′ südwestlich vom Kern rund -370 km, dagegen 2′ nordöstlich vom Kern rund -260 km. Messungen längs der kleinen Achse ergaben konstante Geschwindigkeit. In NGC 4594 wurde an der Westseite die Geschwindigkeit $+800$ km, an der Ostseite $+1600$ km festgestellt. In 2′ Abstand von der Mitte beträgt die Rotationsgeschwindigkeit 330 km. Die Radialgeschwindigkeit ändert sich linear mit dem Abstand von der Mitte, d. h. die Rotation findet wie bei einem festen Körper statt. Dies läßt verschiedene Interpretationen zu, auf die einzugehen jedoch keinen Zweck hat, bevor feststeht, ob nur die Bewegung der Randpartien des Nebels oder die seiner Gesamtmasse durch die Beobachtung erfaßt wird.

Spektrographisch läßt sich natürlich nur bei solchen Nebeln die Rotationsbewegung feststellen, deren Ebenen wenig gegen die Gesichtslinie geneigt sind. Bei den sehr offenen Spiralnebeln kann nur die direkte Ausmessung auf der photographischen Platte zum Ziel führen. Dies scheint wenigstens in einem Falle, bei M 101, van Maanen gelungen zu sein. Er verglich Aufnahmen dieses stark granulierten Spiralnebels am Crossley-Reflektor (Lick) von Keeler 1899, Perrine 1908, Curtis 1914 und zwei von Ritchey, 1910 und 1915 am 60-zölligen Reflektor auf dem Mt. Wilson miteinander. Es wurden bis zu 87 Nebelknoten sorgfältig an 32 Vergleichssterne der Umgebung angeschlossen. Als jährliche Translationsbewegung des ganzen Nebels relativ zu den Sternen ergab sich $+0.005''$ in Rektaszension, $-0.013''$ in Deklination. Die nach Abzug dieser Translationsbewegung übrigbleibenden inneren Bewegungen zeigen eine deutliche Rotation des Nebels und eine Bewegung längs der Spiralarme nach außen an. Als wirkliche Rotation aufgefaßt, erfolgt die Bewegung nach der konkaven Seite der Spiralen. Die äußeren Teile rotieren langsamer, so daß die Spirale sich scheinbar abwickelt. Die Rotationsperiode in 5′ Abstand von der Mitte beträgt nur 85000 Jahre. In Bogenmaß beträgt die mittlere jährliche Rotationsbewegung in 5′ Abstand vom Zentrum $0.022''$ in der Richtung NWSO, die mittlere jährliche radiale Bewegung nach außen $0.007''$. Nimmt man an, daß die Rotationsbewegung in M 101 von derselben Größenordnung wie die spektrographisch in NGC 4594 gefundene ist, so ergibt sich für NGC 4594 die Parallaxe $0.00013''$. Von derselben Ordnung ergibt sich nach Curtis

Parallaxe des Spiralnebels NGC 4594.

die Parallaxe der Spiralnebel aus ihren durchschnittlichen Eigenbewegungen.[142]) Der Wert ist möglicherweise viel zu groß. Ein dritter Versuch, die Parallaxe der Spiralnebel zu bestimmen, wird gleich erörtert werden; er gründet sich auf die Helligkeit der in Spiralnebeln aufgetauchten Novae und führt zu weit kleineren Parallaxen.

Neue Sterne in den Spiralnebeln.

Das Aufleuchten zahlreicher Neuer Sterne in Spiralnebeln ist eine weitere Merkwürdigkeit, die diese Gebilde uns darbieten. Die älteste in einem Spiralnebel beobachtete Nova ist die von Hartwig entdeckte Nova S Andromedae von 1885, die nahe der Mitte des Andromedanebels aufleuchtete. Sie erreichte die 7. Größe. Ebenso hell wurde die von Fleming entdeckte Nova Z Centauri von 1895 in NGC 5253. In neuester Zeit folgen sich die Entdeckungen mit großer Schnelligkeit: Nova Ritchey 1917 in NGC 6946; ferner nachträglich auf älteren Aufnahmen von 1909 zwei Novae im Andromedanebel, die die Helligkeit 16.3^m und 17.0^m erreichten; eine Nova 1917 (Shapley) in demselben Nebel 17.5^m; eine Nova 1915 14^m, in NGC 4527 (Curtis); von demselben gefunden zwei Novae in NGC 4321, 1901, 13.5^m und 1914, 14^m usw. Man hat unter der Voraussetzung, daß die neuen Sterne in den Spiralnebeln durchschnittlich die gleiche absolute maximale Helligkeit erreichen wie die isolierten Novae in der Milchstraße, versucht, mittels derselben die Parallaxe der Spiralnebel abzuschätzen und gelangte für die allernächsten Spiralnebel zu Entfernungen von mehreren hunderttausend Lichtjahren.[143]) Für den Andromedanebel z. B. findet Lundmark $p = 0.000006''$ und einen Durchmesser von 23000 Lichtjahren. Das Ergebnis ist sehr problematisch, da die mittlere Parallaxe der galaktischen Novae noch ganz unsicher ist, ganz abgesehen davon, daß die obige Voraussetzung auf ihre Gültigkeit vorerst noch gar nicht geprüft werden kann. Immerhin ist es auch aus dem früher angeführten Grunde ziemlich wahrscheinlich, daß die Spiralnebel im Durchschnitt erheblich weiter entfernt sind als die kugelförmigen Sternhaufen.

Parallaxen der Spiralnebel aus den Novae.

Kosmische Stellung der Spiralnebel.

Es erhebt sich also die schon eingangs berührte Frage, ob die Spiralnebel noch zu unserem galaktischen System gehören oder selbst galaktische Systeme von demselben Range wie das unsrige sind. Die Frage läßt sich heute noch nicht beantworten. Seeligers Untersuchungen über den Bau der Milchstraße auf Grund von Sternabzählungen führten zu einem Durchmesser unseres Sternsystems von einigen zehntausend Lichtjahren. Dieses Ergebnis ist nach der Art seiner Gewinnung zweifellos ein verhältnismäßig sehr gut fundiertes, aber es erscheint nicht ausgeschlossen — nach den Ergebnissen der Shapleyschen Untersuchungen über die ziemlich sicher zum galaktischen System gehörenden kugelförmigen Sternhaufen ist es sogar wahrscheinlich —, daß der Seeligersche Wert sich nur auf den dichteren inneren Teil unseres Systems bezieht. Andernfalls müßten nicht nur die Spiralnebel, sondern auch die meisten Sternhaufen als außerhalb desselben angenommen werden. Es ist nicht Aufgabe dieses Abschnittes, diese Frage näher zu erörtern, und sie soll daher hier nur angedeutet werden.

Es bleiben noch die echten Gasnebel zu betrachten. Vorweg sei bemerkt, daß ihre Zugehörigkeit zu unserem System wohl als erwiesen gelten kann. Für einige derselben, wie den Orionnebel oder die planetarischen Nebel, liegen ziemlich zuverlässige direkte oder indirekte Parallaxenbestimmungen vor, die alle übereinstimmend diese Gebilde in nicht sehr große Entfernungen versetzen. So wird für den Orionnebel eine Parallaxe von etwa 0.005″ angenommen; für den planetarischen Nebel NGC 7662 fand van Maanen 0.023″ mit einer wahrscheinlichen Unsicherheit von ±0.004″. Außerdem beweist ihre galaktische Verteilung und der offenbare Zusammenhang mit den in ihnen stehenden Sternen deutlich die Zugehörigkeit zur Milchstraße. Endlich ergibt sich die Bewegung der Sonne aus den Radialgeschwindigkeiten der Gasnebel nahezu ebenso wie aus den helleren Sternen.

Die Gasnebel. Zugehörigkeit zum System der Milchstraße.

Unter den Gasnebeln kann man zunächst zwei große, deutlich gegeneinander begrenzte Klassen unterscheiden: die großen, unregelmäßig geformten „chaotischen“ Nebel nach Art des Orionnebels oder des Amerikanebels und die kleinen regelmäßig geformten planetarischen und ringförmigen Nebel einschließlich der Nebelsterne. Die Aufnahmen Barnards und Wolfs mit kurzbrennweitigen photographischen Objektiven haben weiter ganz ausgedehnte, große Flächen des Himmels überziehende, vielleicht sogar überall vorhandene Nebelmaterie von schwächster Leuchtkraft und zartester Struktur enthüllt. Man wird diese Nebelschleier wohl nicht in eine besondere Klasse zu stellen haben, nachdem z. B. Wolf auch für den Orionnebel eine ungeheuer viel größere Ausdehnung nachgewiesen hat, als man ihm bis dahin zuerkannte. Auch die dunkeln Spalten und Löcher in stern- und nebelreichen Feldern der Milchstraße, deren Erforschung sich ebenfalls die beiden genannten Astronomen besonders angelegen sein lassen, und die man wohl mit Recht für nichtleuchtende, vor dem leuchtenden Hintergrunde schwebende absorbierende Nebelmaterie hält[144]), wird man wohl zunächst noch in die erste der oben aufgestellten Klassen aufnehmen. Andererseits gibt es noch eine große Zahl von kleineren, mehr oder weniger regelmäßig geformten Gasnebeln wie den Dumbbellnebel oder den Crabnebel, die bis auf weiteres zu der zweiten Klasse gestellt werden können, denen sie in mancher Hinsicht näher stehen als den großen unregelmäßigen Nebeln. Auch zwischen den planetarischen und den ringförmigen Nebeln besteht kein wesentlicher Unterschied. Erstere haben sich in sehr vielen Fällen ebenfalls als ringförmig herausgestellt, und auch in jeder anderen Beziehung zeigen sie ein identisches Verhalten. Ihrer nahen Verwandtschaft mit den Wolf-Rayet-Sternen wegen müssen die letzteren in die Betrachtung hineingezogen werden. Weniger klar dürfte die Stellung der Nebel nach Art der Plejadennebel, des Nova Persei-Nebels und der mit den Veränderlichen vom R Coronae-Typus in Verbindung stehenden Nebel sein, die zum Teil wesentlich im reflektierten Licht der in ihnen stehenden hellen Sterne leuchten. Hier hat man es möglicherweise nicht immer mit echten Gasnebeln, sondern mit kosmischen Staubmassen zu tun.

Einteilung.

Galaktische Verteilung.

Was die Verteilung der Nebel angeht, so finden sich die großen und unregelmäßigen fast ausschließlich in der Milchstraße und an den Rändern derselben, während die planetarischen zwar nach der Milchstraße eine starke Konzentration zeigen, aber spärlich auch fern von derselben vorkommen. Beide Klassen sind längs der Milchstraße (in galaktischer Länge) ungleichmäßig verteilt. Die Magellanschen Wolken sind ebenfalls reich an echten Gasnebeln, während ihre Umgebung fast ganz frei von ihnen ist.

Spektrum.

Bezüglich der Erforschung der Gasnebel ist man neben der unmittelbaren photographischen Abbildung vor allem auf die spektrographischen Methoden angewiesen — hier interessieren in erster Linie das Spektrum und die Radialgeschwindigkeit. Sowohl die großen unregelmäßigen wie die kleinen regelmäßigen Nebel haben im wesentlichen ein diskontinuierliches Emissionsspektrum von charakteristischen, beiden Klassen gemeinsamen Zügen. Ein kontinuierliches Spektrum ist wohl in den meisten Fällen untergelagert, jedoch ist es in der ersten Klasse außerordentlich schwach, während es in der zweiten Klasse, besonders wenn ein deutlicher, sternartiger Kern vorhanden ist, oft bedeutende Helligkeit erreicht und dann im Kern selbst mitunter auch Absorptionslinien aufweist. Das typische Nebelspektrum enthält neben der ersten Nebenserie des Wasserstoffs (Hα, Hβ...) und den Heliumlinien insbesondere die einem noch unbekannten Element angehörenden „Hauptnebellinien“ λ 5007 (N_1), 4959 (N_2), 4363 (N_3) und eine sehr helle Emission bei 3727 (Doppellinie). Nach den Untersuchungen von Keeler, Scheiner und Wilsing ist das Helligkeitsverhältnis $N_1 : N_2$ in allen Nebeln konstant, während das Verhältnis dieser Linien zu den übrigen Linien von Nebel zu Nebel und sogar innerhalb desselben Nebels von Punkt zu Punkt schwankt. Man hat daraus geschlossen, daß N_1 und N_2 demselben Element angehören; der Schluß ist vielleicht nicht zwingend.[108]) Von sonstigen bemerkenswerten Emissionslinien ist noch die bekannte Linie 4686 besonders zu erwähnen, da sie auch in den Spektren vom Typus O auftritt.

Der Orionnebel.

Als typischer Repräsentant der großen unregelmäßigen Nebel soll der Orionnebel näher betrachtet werden. Die äußeren Formen der unregelmäßigen Nebel sind so mannigfaltig, daß man gemeinsame Züge außer der großen Ausdehnung und der Unregelmäßigkeit kaum entdecken kann. Der hellere Teil des Orionnebels wird häufig mit einem geöffneten Tierrachen verglichen.

Große Ausdehnung.

Die Photographie, die auch die visuell schwächer leuchtenden, aber photographisch sehr wirksamen Teile des Nebels enthüllt, verwischt dieses Bild vollständig und zeigt in den langbelichteten Aufnahmen von W. H. Pickering, Wolf und Barnard eine erstaunliche Ausdehnung des Nebels. Er umhüllt nicht nur die drei Gürtelsterne des Orion, sondern erstreckt sich in spiralig gewundenen Fortsätzen bis γ Orionis im Norden und β Orionis im Süden. Nach Wolf bedeckt der Nebel ein Areal, das mindestens von -20^0 bis $+25^0$ in Deklination und von 4^h40^m bis 6^h40^m in Rektaszension reicht.[14 a]) Ganz anders gestaltet ist z. B. der $1^1/_3{}^0$ lange Zirrusnebel im Schwan, der einer spiralig gewundenen, langgestreckten, zarten Zirruswolke gleicht, oder

der kompaktere, mehr als sieben Quadratgrade bedeckende Nordamerikanebel, ebenfalls im Schwan, so genannt nach der Ähnlichkeit seines Umrisses mit dem nordamerikanischen Kontinent.

Das Spektrum des Orionnebels ist der Gegenstand sehr zahlreicher Untersuchungen gewesen, die eine große Menge interessanter Tatsachen ans Licht gefördert haben. Es hat sich u. a. ergeben, daß die leuchtenden Gase des Nebels keineswegs überall gleichmäßig gemischt sind. Die ersten Anzeichen ungleichmäßiger Verteilung der Gase im Orionnebel fanden bereits Keeler, Hartmann und Hale durch Verwendung von Farbenfiltern und farbenempfindlichen Platten. Dies wurde dann später spektrographisch bestätigt. So rührt die große photographische Aktivität gewisser Teile des Nebels nach Hartmann von dem Vorherrschen des Elements her, das die Linie 3727 hervorbringt. In einigen Nebeln der zweiten Klasse besteht die Strahlung fast ausschließlich aus dieser einen Wellenlänge. Ebenso interessante Tatsachen hat das Studium der Radialgeschwindigkeit des Orionnebels enthüllt. Der Nebel als Ganzes hat eine kaum nachweisbare Bewegung relativ zu unserem Sternsystem. Vogel und Eberhard, Buisson, Fabry und Bourget fanden, daß die Radialgeschwindigkeit des Nebels von Punkt zu Punkt verschieden ist und starke lokale Strömungen im Innern desselben anzeigt. Die Gegend nordöstlich vom Trapez hat eine um 5 km größere, die Gegend südwestlich vom Trapez eine um 5 km geringere Geschwindigkeit als dieses selbst. Mit Berücksichtigung dieser Geschwindigkeiten ergaben sich die Wellenlängen der beiden Komponenten der Nebellinie 3727 zu 3726.100 und 3728.838. Die Geschwindigkeit des Nebels ist sehr nahe dieselbe wie die der hellen Sterne vom Typus B, die in ihm stehen. Dies bestätigt die schon aus dem unmittelbaren Anblick der Nebelaufnahmen und den Einzelbewegungen gewonnene Überzeugung, daß Sterne und Nebel eine zusammengehörige Sondergruppe innerhalb des galaktischen Systems bilden. Es wurde auch versucht, aus der Breite der Emissionslinien auf Grund der kinetischen Gastheorie das Atomgewicht und die Temperatur der in dem Nebel leuchtenden Gase zu bestimmen. Aus den obigen beiden Linien ergab sich das Atomgewicht des zugehörigen Elements zu rund 3; die Nebellinie 5007 gehört einem Gas von kleinerem Atomgewicht an. Für die absolute Temperatur wurde die obere Grenze 15000° gefunden. Das Vorhandensein lokaler Strömungen im Orionnebel wurde von Frost, Campbell und Moore bestätigt.[145b]) Die von den französischen Forschern ausgesprochene Ansicht, daß der ganze Nebel rotiere, wird von den anderen nicht unbedingt geteilt.

Verteilung der Gase im Orionnebel.

Radialgeschwindigkeit des Orionnebels.

Atomgewicht der unbekannten Nebelgase und Temperatur des Orionnebels.

Die Radialgeschwindigkeiten der großen, unregelmäßigen Nebel sind im Gegensatz zu den planetarischen durchschnittlich klein; im Mittel ergab sich für 7 Nebel 10 km, nicht viel mehr als für die schwach bewegten Sterne vom Spektraltypus B.

Radialgeschwindigkeiten der großen Gasnebel.

In mancher Beziehung ähnlich dem Orionnebel verhält sich der Plejadennebel. Wie jener ist er mit einer hellen Sterngruppe vom Spektraltypus B verknüpft und erstreckt sich nach den Aufnahmen von Barnard und Wolf

Der Plejadennebel.

über, viele Quadratgrade in der Umgebung der Sterngruppe. Er ist aber sehr lichtschwach, so daß sein Spektrum noch nicht eingehender untersucht werden konnte. Merkwürdigerweise fand Slipher es in der Nachbarschaft der hellen Plejadensterne kontinuierlich und übereinstimmend mit dem Spektrum der Sterne, woraus sich ergeben würde, daß die Nebelmaterie dort vorwiegend in dem reflektierten Licht der Sterne leuchtet. Die physikalische Möglichkeit dieser Erklärung hat Hertzsprung nachgewiesen. Wieweit das Spektrum des von den Sternen erleuchteten Himmelsgrundes (der Atmosphäre) mit hineinspielt, läßt sich schwer beurteilen. Ein anderes Objekt dieser Art ist der Nebel NGC 7023, der nach Pease ein kontinuierliches Spektrum gleich dem des in ihm stehenden Sternes 7. Größe hat mit Absorptionslinien die eine Radialgeschwindigkeit von + 0.7 km ergeben.[146])

Nichtleuchtende Nebelflecke.

Sehr merkwürdig sind die Sternleeren, Sternhöhlen, Höhlennebel, „dark markings", oder wie man sie sonst noch genannt hat, nebelfleckartig gestaltete dunkle Flecken, die vorwiegend in der Milchstraße auftreten, sich deutlich von dem mattschimmernden nebeligen oder sternreichen Hintergrund abheben und häufig mit leuchtenden Nebelmassen in Verbindung stehen oder sich auf sie projizieren, zuweilen aber auch isoliert auftreten. Die Kenntnis dieser Gebilde ist, wie schon bemerkt, besonders durch Wolf und Barnard gefördert worden. Letzterer stellte einen Katalog von 182 solchen Gebilden auf. Die großen Milchstraßennebel sind zum Teil von solchen Sternleeren umrahmt. Die auffälligsten und bekanntesten finden sich in den Nebelregionen der Milchstraße bei ρ und θ Ophiuchi, bei π_2 Cygni (Coconnebel) und im Cepheus ($\alpha = 20^h 48^m$, $\delta = +59.6^0$, 1855). Die Randnebel der Höhlen haben nach Wolf ein schwaches Gasspektrum, die Höhlennebel selbst, die um helle sternartige Kerne lagern, ein kontinuierliches Spektrum, wozu das gleiche zu bemerken ist wie bei den Plejadennebeln. Slipher findet für den Nebel um ρ Ophiuchi ebenfalls ein kontinuierliches Spektrum, das dem des Sternes gleicht.[147])

Ausgedehnte Nebelregionen.

Über die großen Nebelregionen ist Physikalisches wenig zu sagen; sie sind im allgemeinen zu schwach leuchtend für eine Untersuchung ihres Spektrums. Auch sie finden sich hauptsächlich in und nahe bei der Milchstraße. Eine besonders ausgezeichnete liegt nach Barnard im Skorpion und Ophiuchus; über Teile derselben ist vorhin bereits bei den dunkeln Nebeln berichtet worden. Sie hüllen die Sterne der Gegend ein, ohne aber ihr Licht gänzlich auszulöschen. Eine andere, hauptsächlich von Wolf erforschte Nebelregion im Orion wurde bereits erwähnt. Es ist wahrscheinlich, daß der größte Teil des Himmels von solcher schwachleuchtenden Nebelmaterie überzogen ist.[148])

Die kleinen regelmäßigen Gasnebel.

Die kleinen regelmäßigen Nebel — planetarische, ringförmige, Nebelsterne usw. — unterscheiden sich in physikalischer Beziehung nur insofern wesentlich von den übrigen Gasnebeln, als die meist in ihnen auftretenden sternartigen Verdichtungen ihrem Spektrum nach den Sternen näher stehen als den Nebeln, während die Nebelhüllen echte Gasnebel sind. Dagegen

verhalten sich ihre Radialgeschwindigkeiten ganz verschieden, indem ziemlich hohe Werte derselben die Regel bilden. Dies erhellt aus der folgenden Zusammenstellung nach Campbell und Moore: Radialgeschwindigkeiten derselben.

7 ausgedehnte Nebel	mittlere Geschwindigkeit	10	km
73 planetar. oder regelmäßige Nebel	„	39	„
34 Nebelsterne	„	50	„
39 scheiben- oder ringförmige Nebel	„	29	„

Unter den regelmäßigen Nebeln sind Fälle sehr hoher Geschwindigkeit bekannt; so hat der Nebel NGC 6644 + 202 km, der nur wenige Grade entfernte Nebel NGC_2 4732 — 136 km, der Crabnebel nach Sanford — 800 km. Sieben Gasnebel mit mehr als 80 km Geschwindigkeit haben im Durchschnitt 132 km. Dagegen ist kein Vorherrschen einer bestimmten Richtung, wie bei den Spiralnebeln und kugelförmigen Sternhaufen, bemerkbar; das algebraische Mittel der Geschwindigkeiten ist nahezu Null. Auffallend ist, daß die Geschwindigkeiten nicht nach der Wahrscheinlichkeit verteilt sind, sondern daß alle Werte ziemlich gleichhäufig vertreten sind. Eine besondere Stellung nehmen die Gasnebel in den Magellanschen Wolken ein, die, soweit sie untersucht sind, an der Bewegung des Systems, dem sie angehören, teilnehmen. So haben nach Wilson 5 Gasnebel in der kleinen Wolke Geschwindigkeiten zwischen + 158 und + 301 km.[149])

Innere Bewegungen in den planetarischen Nebeln.

Die Versuche, innere oder Rotationsbewegungen in den regelmäßigen Nebeln festzustellen, sind in den letzten Jahren von Erfolg gekrönt gewesen. Unter 40 Nebeln zeigten 20 deutliche relative Bewegungen innerhalb der Nebel, die sich durch leichte Neigung oder Krümmung der Spektrallinien oder auch Verdopplungen, letztere nahe der Mitte der Nebel, verriet. Je größer die Elliptizität der Begrenzung des Nebels, desto größer war im allgemeinen der beobachtete Effekt. Die Rotationsachse fiel anscheinend mit der kleinen Achse des Nebels nahe zusammen. Die Rotationsgeschwindigkeit wurde in der Mitte am größten gefunden; nach dem Rande nahm sie angulär und linear ab. Sie ist in allen Fällen ziemlich klein; die größte bisher gefundene differentielle Geschwindigkeit beträgt 42 km (NGC 7026). In den Ringnebeln sind vielleicht andere Formen von innerer Bewegung als Rotation vorhanden. So zeigten die Spektrogramme im Ringnebel in der Leier beträchtliche innere Bewegungen an, die nicht als Rotationsbewegung interpretiert werden können. In einigen Fällen war große Geschwindigkeit der Nebelmaterie nach dem Kern angedeutet.

Minimalmassen der planetarischen Nebel.

Unter Voraussetzung Keplerscher Bewegung um die Zentralmasse und einer mittleren wahrscheinlichen Entfernung von 1000 Lichtjahren (abgeleitet von Curtis aus der durchschnittlichen Eigenbewegung und Radialgeschwindigkeit) ergaben sich die Minimalmassen (Neigung der Rotationsachse gegen die Gesichtslinie 90°) von 9 „rotierenden“ Nebeln zwischen 4 und 120 Sonnenmassen.[150])

Stellung der Gasnebel in der Entwicklungsreihe.

Eine der wichtigsten, die Gasnebel und insbesondere die regelmäßigen (planetarischen und ringförmigen) betreffenden Fragen ist die ihrer Stellung in der Entwicklungsreihe der Sterne oder, was auf dasselbe hinausläuft,

innerhalb des Spektralsystems. Hier haben zahlreiche Untersuchungen eingesetzt mit dem Ziel, den schon früh vermuteten Zusammenhang zwischen den planetarischen und ringförmigen Nebeln einerseits und den Wolf-Rayet-Sternen andererseits zu erforschen. Ihre Erörterung macht zunächst einige vorbereitende Bemerkungen nötig.

Zahl, Durchmesser, Parallaxen usw. der regelmäßigen Gasnebel.

Die Zahl der bekannten planetarischen Nebel beträgt noch nicht 150, ist also sehr beschränkt, was auf einen sporadischen Fall der Sternentwicklung hinweist (Curtis, Campbell und Moore). Ihre scheinbaren Durchmesser zeigen eine Abhängigkeit von der galaktischen Breite in der Weise, daß, je kleiner der Durchmesser, desto kleiner im Durchschnitt auch der Abstand von der Milchstraße, mit andern Worten, die größeren stehen der Sonne durchschnittlich näher als die kleineren. Zwischen ringförmigen, planetarischen und sternartigen Nebeln kommen alle Übergänge vor: die Extreme sind eine mehr oder weniger helle, ziemlich scharf begrenzte, planetenartige Scheibe ohne auffallende zentrale Verdichtung, und ein nahezu sternartiger Kern mit nur noch schwach leuchtender Nebelhülle (Nebelsterne). Die Mehrzahl der planetarischen Nebel zeigt bei genauerer Untersuchung ebenfalls mehr oder weniger ausgeprägte Ringform. Die scheinbaren Durchmesser schwanken zwischen 15′ (NGC 7293) und wenigen Sekunden; die untere Grenze wird hauptsächlich von den Nebelsternen gebildet. Man nennt häufig auch die in ausgedehnten Nebeln stehenden und mit ihnen in offenbarem Zusammenhang stehenden Sterne „Nebelsterne", es soll das Wort hier aber in der angedeuteten beschränkteren Bedeutung gebraucht werden. An einigen planetarischen Nebeln mit sternartigem Kern hat van Maanen direkte Parallaxenbestimmungen ausgeführt, aus denen folgende Dimensionen und absolute Helligkeiten ($p = 0.1''$) der Zentralsterne sich ergeben; zum Vergleich diene die Angabe, daß der Durchmesser der Neptunsbahn 60 Astron. Einheiten (zu je 150 Mill. km) beträgt.

NGC	Absolute Parallaxe	Absolute Helligk. des Zentralsterns	Scheinbarer Durchmesser	Wahrer Durchm. in Astron. Einheiten	Wahrer Durchm. in Lichtjahren
2392	+ 0.022″	+ 6.7^m	46″	2100	0.03
6720	+ 0.008	+ 9.2	80	10000	0.16
6804	+ 0.022	+ 10.1	32	1450	0.02
6905	+ 0.015	+ 10.4	47	3100	0.05
7008	+ 0.016	+ 8.8	95	5900	0.09
7662	+ 0.023	+ 9.7	31	1350	0.02

Die absolute Helligkeit der Zentralsterne ist also auffallend gering. Die O-Sterne, mit denen sie nachher zu vergleichen sein werden, haben nach van Maanen eine durchschnittliche Helligkeit von etwa 0^m. Die geringe absolute Helligkeit der Zentralsterne der planetarischen Nebel steht übrigens in merkwürdigem Einklang mit ihrer hohen durchschnittlichen Radialgeschwindigkeit von 29 km. Für 13 K- und M-Sterne der mittleren absoluten Helligkeit 10.0^m fanden Adams und Strömberg im Mittel 30 km.[151])

Das Gesamtspektrum der planetarischen und verwandten Nebel ist, wie

bereits bemerkt, ein typisches Gasnebelspektrum, in der Regel mit mehr oder weniger kräftigem kontinuierlichen Untergrund, der aber auch scheinbar ganz fehlen kann. Da auch nach der älteren Auffassung der Spektralreihe die Gasnebel, und unter ihnen besonders die anscheinend am weitesten in der Kondensierung fortgeschrittenen planetarischen, dem frühesten Spektraltypus am nächsten stehen mußten, so forschte man schon frühzeitig nach Übergängen und Beziehungen zwischen den planetarischen Nebeln und den Wolf-Rayet-Sternen. Bereits Pickering und Keeler hatten 1890 auf die Ähnlichkeit der Spektren der O-Sterne mit den Spektren der Gasnebel hingewiesen, und Keeler insbesondere hatte schon die Übereinstimmung der Spektren der Kerne der planetarischen Nebel und der O-Sterne erkannt. Campbell erörterte 1894 die Frage in Verbindung mit einer Untersuchung des Spektrums der Wolf-Rayet-Sterne, kam jedoch im wesentlichen zu einem negativen Ergebnis. Später hat Wright die Frage mit geeigneteren instrumentellen Mitteln wieder aufgegriffen und die Identität der Spektren der Nebelkerne mit den Spektren vom Typus O in allen Fällen, in denen die Spektren Einzelheiten erkennen ließen, festgestellt. Damit war wenigstens in spektraler Beziehung die Brücke geschlagen. Eine starke Stütze erfuhr die Feststellung durch Wrights schon erwähnten Nachweis einer kontinuierlichen Reihe von Übergängen zwischen den reinen planetarischen Nebeln über die Nebelsterne hinweg zu den O-Sternen; ferner durch die schon früher erwähnte Entdeckung Hartmanns, daß das Spektrum der Novae aus dem Nebeltypus allmählich in den Wolf-Rayet-Typus übergeht, so daß die Neuen Sterne, gleichsam wie nach dem biogenetischen Grundgesetz die Organismen in ihrem Embryonalzustande ihre Stammesgeschichte in abgekürzter Form durchlaufen, in schneller Folge die Entwicklungsgeschichte eines Sternes uns vor Augen zu führen scheinen. Eine Ähnlichkeit zwischen den Novae und den Zentralsternen der planetarischen Nebel besteht auch insofern, als die ersteren in ihrer normalen Helligkeit wahrscheinlich ebenfalls zu den absolut schwachen Sternen gehören. Nur eine große Schwierigkeit ließ sich vorläufig nicht überwinden. Die durchschnittliche Radialgeschwindigkeit der dem Typus O folgenden Sterne des Typus B ist sehr klein, etwa 6 km; für die folgenden Spektralklassen nimmt sie allmählich zu. Man sollte daher erwarten, daß die durchschnittliche Geschwindigkeit der O-Sterne und der planetarischen Nebel noch kleiner oder mindestens ebenso klein sei als die der B-Sterne, um so mehr, als man für die ausgedehnten Gasnebel, die eine noch frühere Stufe als die planetarischen darzustellen scheinen, äußerst kleine Geschwindigkeiten gefunden hatte. Dies ist aber, wie schon gezeigt wurde, durchaus nicht der Fall; die planetarischen und verwandten Gasnebel zeigen durchschnittlich hohe Geschwindigkeiten, während für die O-Sterne vorerst nur sehr spärliche Beobachtungsbelege vorhanden sind, aus denen noch keine Schlüsse gezogen werden können. Diese Schwierigkeit scheint nunmehr auch behoben zu sein, nachdem Ludendorff es wahrscheinlich gemacht hat, daß bei den frühen B-Sternen diejenigen mit größerer Masse

Spektrum der regelmäßigen Gasnebel. Zusammenhang mit den O-Sternen.

durchschnittlich eine mit der der planetarischen Nebel durchaus vergleichbare, viel größere Geschwindigkeit besitzen als die übrigen. Die Massen der planetarischen Nebel sind aber allem Anschein nach ebenfalls recht beträchtlich im Vergleich zu denen der gewöhnlichen Sterne. Die planetarischen Nebel schließen sich demnach also durch Vermittlung der O-Sterne den B-Sternen mit großen Massen an. Man hat hier wiederum ein Anzeichen dafür, daß die planetarischen und verwandten Nebel einen besonderen, nicht regelmäßigen Fall der Sternentwicklung darstellen, hervorgerufen wahrscheinlich durch ungewöhnlich große Masse, die aus irgendeinem Grunde (Strahlungsdruck?) einen vorübergehend instabilen Zustand zur Folge hat.

Es mögen noch einige Bemerkungen über das Spektrum der planetarischen Nebel im Zusammenhang mit dem der O-Sterne folgen. Wright verglich die beiden Objekte NGC 6572 und BD + 30°3639 miteinander, von denen das erstere ein planetarischer Nebel mit nebeligem Kern, das letztere ein O-Stern mit einer 7″ großen schwachen Nebelhülle ist, die im Fernrohr unmittelbar nicht sichtbar ist, aber spektroskopisch sich dadurch verrät, daß die hellen Wasserstofflinien des Sternspektrums dasselbe zu beiden Seiten überragen. Eingehende Untersuchungen ergaben die Identität des Spektrums der schwachen Nebelhülle von BD + 30°3639 mit dem des planetarischen Nebels, während der Stern selbst und der Kern des Nebels ein Spektrum vom Typus O besitzen. Die Hauptnebellinien sind im Spektrum des Sternes nicht vorhanden, wie umgekehrt die typischen Wolf-Rayet-Bänder in der Nebelhülle bzw. dem Nebel fehlen. Nachgewiesen sind in der Nebelhülle von BD + 30°3639 die Nebellinien 3726, 3729, 4069, 4076, 4959, 5007, 5755, 6303, 6548, 6583, 6730 und die Wasserstoffserie von Hα bis Hλ. Indessen reichen anscheinend nicht alle Linien durch die ganze Hülle hindurch; so sind z. B. 5007 und 4959 sehr schwach und kürzer als die Wasserstofflinien. Der Befund ist typisch für alle planetarischen Nebel und Nebelsterne. Zuweilen zeigen die Kerne der Nebel ein rein kontinuierliches Spektrum, dessen Intensitätsverteilung jedoch die der O-Sterne ist; bei der Lichtschwäche der meisten dieser Objekte ist es nicht überraschend, daß es oft nicht gelingt, die verwaschenen und nicht immer sehr hervorstechenden hellen Bänder herauszubringen. Die Frage, ob nicht alle Wolf-Rayet-Sterne als Kerne von planetarischen Nebeln zu betrachten sind, die nur in vielen Fällen bisher ihrer Lichtschwäche wegen der Feststellung entgangen sind, ist noch offen. Nach den früheren Ausführungen ist es aber nicht als wahrscheinlich zu erachten, daß dies der Fall ist, da nicht notwendig jeder Wolf-Rayet-Stern das Nebelstadium zu durchlaufen braucht.[152])

Geschichtete Emission in den Gasnebeln.

Es ist vorhin eine Frage berührt worden, die von größerem Interesse zu werden verspricht. Es wurde erwähnt, daß die hellen Linien der Hülle des Nebelsternes nicht alle gleich lang gefunden werden. Diese Erscheinung findet ihre Beleuchtung durch mehrjährige, schon früher einsetzende Untersuchungen von Wolf an planetarischen und ringförmigen Nebeln. Es ergab sich, daß die Länge der Linien, von der Mitte der Nebel aus gerechnet, eine

ganz bestimmte, stets wiederkehrende Reihenfolge einhält. Die emittierenden Gase sind also in diesen Nebeln nicht gleichmäßig durcheinander gemischt, sondern nach einem noch unbekannten Prinzip geschichtet. So wurden im Ringnebel in der Leier die Linien Hα, 5007, 4959, Hβ, 4686, 4472, 4363, 4340, 4102, 4071, 3968, 3869, 3727 festgestellt. Der Durchmesser des Ringes beträgt in der Richtung der Rektaszenion 86″, der des Hohlraumes 47″. Die Linie 4686 z. B. erfüllt nur den schwach leuchtenden Hohlraum, fehlt aber in dem hellen Ring, während die Nebellinie 3727 im Hohlraum schwach, aber im Ring hell ist und bis zum äußeren Rande des Ringes reicht. Ebenso verhalten sich die Nebel H IV. 39 Argus und der Dumbbellnebel. Die Wasserstofflinien reichen zwar auch bis zum äußersten Rande der Nebel, haben aber ihr Helligkeitsmaximum mehr nach dem Innern als die Linie 3727. Auch Wright bemerkt die verschiedene Länge der Linien in den planetarischen und verwandten Nebeln. Ähnliche ungleichmäßige Verteilung der Gase ist schon früher beim Orionnebel erwähnt worden, wo sie von Hartmann, Campbell u. a. bemerkt wurde. Wright findet in den planetarischen Nebeln in Übereinstimmung mit Wolf die Linie 4686 stets unter den kürzesten, dann folgen die Linien des He, Nu, H. Es ist bemerkenswert, daß die Linie 4686 in den Wolf-Rayet-Spektren ein charakteristisches Band bildet. Im Sinne der vorhin skizzierten Anschauung, nach der ein planetarischer Nebel sich in einen O-Stern entwickeln muß, oder das Umgekehrte der Fall sein kann, bezeichnet die Länge der Linien die Reihenfolge der Einziehung der Gase in den Kern oder umgekehrt die Reihenfolge, in der die Gase vom Kern abgestoßen werden. Nicht in allen Nebeln ist die Schichtung so ausgeprägt, wie in den besprochenen Fällen; so ist der Nebel NGC 7027 ungewöhnlich homogen, die Linie 4686 wahrscheinlich ebenso lang wie die übrigen Linien.

Die Linie 4686 und die anderen kurzen und langen Linien hat Wright zu seiner bereits erwähnten Klassifizierung der Nebel benutzt. Er setzt an den Anfang seiner Reihe die Nebel mit homogener Verteilung der Gase, wie NGC 7027, und an das Ende die Nebelsterne mit nur noch schwacher Nebelhülle, in denen die Nebellinien sehr lichtschwach und kurz sind.[158])

Veränderliche Nebel.

Es bleibt noch eine kurze Betrachtung der Nebel mit veränderlicher Helligkeit übrig, die vielleicht mit den vorhin besprochenen wenig gemeinsam haben, möglicherweise aber den bei der Nova Persei beobachteten Nebeln verwandt sind. Der bekannteste ist der schon von Hind 1852 entdeckte veränderliche Nebel NGC 1555 ($4^h 16.1^m$, $+19^0 17'$, 1900). Ganz in seiner Nähe, 15^s vorangehend, 0.2′ südlicher, ist ein zweiter veränderlicher Nebel, NGC 1554, der mit dem ersteren wohl in irgendeinem Zusammenhang steht, und von O. Struve gefunden wurde. Andere Fälle der Art sind NGC 955 ($2^h 25.3^m$, $-1^0 33'$), NGC 3666 ($11^h 19.2^m$, $+11^0 54'$), NGC 6760 ($19^h 6.1^m$, $+0^0 52'$), NGC 6729 ($18^h 52^m$, $-37^0 8'$), NGC 2261 ($6^h 33.7^m$, $+8^0 49'$). Bei einigen bedarf die Veränderlichkeit noch der Bestätigung. Bei diesen meist schwachen und unansehnlichen Nebeln ist es aufgefallen, daß sie zeitweise ziemlich

hell und selbst in kleineren Instrumenten sichtbar waren, zu andern Zeiten dagegen in den lichtstärksten Instrumenten vergeblich gesucht wurden. Auch die Formen sind teilweise veränderlich gewesen. NGC 1554 und 1555 haben offenbar zu dem Veränderlichen T Tauri, NGC 6729 zu R Coronae australis, NGC 2261 zu R Monocerotis, die in ihnen stehen, Beziehungen. Wahrscheinlich ist die Veränderlichkeit der Nebel mit der der Sterne eng verknüpft, jedoch nicht einfach so, daß Helligkeit des Nebels und des Sternes parallel verlaufen. Der Nebel um R Coronae australis macht auf den Aufnahmen von Knox Shaw den Eindruck einer von dem Stern zur Zeit seines Maximums ausgestoßenen Gas- oder Staubwolke, die sich in der Folge von diesem loslöst und verschwindet. Sie scheint wenigstens teilweise im reflektierten Licht des Sternes zu leuchten. Die Änderungen in Form und Helligkeit sind zuweilen bereits innerhalb weniger Tage merklich. Nach den schon früher erwähnten Untersuchungen Ludendorffs gehört der Veränderliche T Tauri zum Typus R Coronae borealis. Sein Spektrum hat helle und dunkle Linien; erstere erinnern an den O-Typus (BD + 30°3639), letztere scheinen dem Typus F5 anzugehören. Die hellen Linien ragen über das kontinuierliche Spektrum hervor und verraten damit eine den Stern umgebende Nebelhülle. Ebenso scheint R Coronae australis dieser Klasse von Veränderlichen anzugehören. Auch der Veränderliche T Orionis, der von Ludendorff zu derselben Klasse gerechnet wird, steht in einer Nebelgegend, die zum Orionnebel gehört. Daß Sterne und Nebel in physischem Zusammenhang stehen, dürfte aus dem Vorhandensein heller Linien in den Spektren aller daraufhin untersuchten Veränderlichen der Klasse hervorgehen. In einzelnen Fällen geht der Zusammenhang übrigens schon aus dem unmittelbaren Anblick hervor; so breiten sich die Nebel 6729 und 2261 von einem Stern oder sternartigen Kern als Kopf kometenartig aus. In dem Nebel 2261 hat Hubble starke Bewegungen und sonstige Änderungen innerhalb weniger Monate feststellen können. Er macht auch darauf aufmerksam, daß die Nebel 6729, 2261, 1555 in einer Sternleere (Höhlennebel?) liegen. Eine Objektivprismenaufnahme von NGC 2261 ergab ein kontinuierliches Spektrum ohne Linien, dessen Helligkeitsverteilung dem Sonnentypus entspricht. Sliph er findet für den Kern ein kontinuierliches Spektrum mit hellen Linien oder Bändern, die aber nicht die für die Gasnebel typischen sind.[154])

Zusammenhang zwischen den veränderlichen Nebeln und den veränderlichen Sternen vom Typus R Coronae borealis.

Photographische Aufnahmen von Sternhaufen und Nebelflecken sind durch gute Reproduktionen in größerer Zahl in dem zweibändigen Atlas von Isaac Roberts und in den Bänden 8 und 11 der Veröffentlichungen der Licksternwarte der Allgemeinheit zugänglich gemacht worden. Dies konnte der großen Herstellungskosten wegen nur mit Hilfe privater Mittel geschehen. Vereinzelte Reproduktionen findet man ferner in den Veröffentlichungen oder Jahresberichten der Heidelberger, der Harvard-, der Yerkes-, der Mount Wilson- und anderer Sternwarten, sowie in den astronomischen Zeitschriften. Für die zahlreichen schönen Aufnahmen der Heidelberger Sternwarte, die durch Originalkopien wenigstens den engeren Fachkreisen nach Möglichkeit

Sammlungen von Sternhaufen- und Nebelfleckaufnahmen.

zur Verfügung gestellt werden, hat sich bisher ein Mäzen nicht gefunden, so daß dieses Kulturdokument nicht die Verbreitung gefunden hat, die es verdient hätte.

IV. Physikalische Theorien. 1. Der innere Aufbau der Fixsterne. Die selbstleuchtenden Fixsterne sind als ungeheure Gasbälle zu betrachten, mit effektiven Oberflächentemperaturen zwischen etwa 3000° und 15000° und inneren Temperaturen, die noch viel höher liegen, ferner mit mittleren Dichten zwischen dem Mehrfachen des Wassers und Werten, die weit unter der Dichte der Erdatmosphäre liegen, endlich mit Massen von etwa $^1/_{10}$ bis zum 30- oder 40fachen der Sonnenmasse (1.9×10^{33} Gramm). In den dichteren Sternen (Dichte von der Größenordnung 0.01 des Wassers oder mehr) können die Gase nicht als im Zustande idealer Gase befindlich angenommen werden, dagegen kann diese Annahme in erster Näherung für die Sterne sehr geringer Dichte gemacht werden. Man mag die letzteren mit den absolut hellen Sternen, den Riesen, die ersteren mit den Zwergen und den Sternen nahe dem Gipfel der Lockyer-Hertzsprung-Russellschen Entwicklungskurve identifizieren. Der innere Aufbau der Fixsterne.

Es entstehen nun folgende Fragen: Woher rührt die hohe Temperatur der Sterne? Woher kommt es, daß die Sterne durch Jahrmillionen hindurch unverändert ihre Strahlung beibehalten, daß ihre Temperatur trotz der enormen Ausstrahlung nicht bereits in historischen Zeiträumen merklich abnimmt? Welches ist die Quelle dieser Strahlung? Erreichen alle Sterne ungefähr die gleiche maximale Temperatur? Wie muß die Konstitution der Sterne angenommen werden, damit die beobachteten Tatsachen erklärlich erscheinen?

Es wird allgemein angenommen, daß die Fixsterne (und ihre Planeten) sich aus dem hypothetischen Anfangszustande, dem chaotischen Gasnebel oder der kosmischen Staubwolke, unter dem Einfluß der Gravitation durch allmähliche Kontraktion gebildet haben. Bei dieser Kontraktion wird Bewegung in Wärme verwandelt; wahrscheinlich spielen auch noch andere physikalische und chemische Vorgänge bei der Wärmeerzeugung mit. Der entstehende Weltkörper erhitzt sich und erreicht schließlich eine außerordentlich hohe Temperatur, wenn die vorhandene Masse genügend groß ist. Es muß zugegeben werden, daß die beobachteten Erscheinungen im allgemeinen zugunsten dieser Vorstellung sprechen. Wir haben anscheinend alle Phasen dieses Entwicklungsprozesses am Himmel vor Augen. Es lag daher der Versuch nahe, die so glücklich eingeführte Vorstellung von der Kontraktion der Materie unter dem Einfluß der Gravitation auch auf den weiteren Werdegang eines fertigen Fixsternes anzuwenden, d. h. in der Kontraktion die Hauptquelle seiner fortgesetzten Strahlung zu suchen (Helmholtz, Lane, Ritter u. a.). Diese Vorstellung hat sich lange Zeit hohen Ansehens erfreut. Neuere theoretische Untersuchungen einerseits und die geologische Forschung andererseits haben jedoch ergeben, daß die durch Kontraktion allein Kontraktionstheorie. Schwierigkeiten der Kontraktionstheorie.

erzeugte Wärme bei weitem nicht ausreicht, um den Strahlungsverlust eines Sternes für die erforderlichen langen Zeiträume zu decken. So findet Eddington bei alleinigem Vorhandensein der Kontraktion als Deckung des Strahlungsverlustes für die Dauer des Gigantenstadiums den unmöglich kurzen Zeitraum von 100 000 Jahren, während von den Geologen allein schon für die Bildung der geologischen Schichten seit dem Silur ein Zeitraum von 100 Millionen Jahren als notwendig erachtet wird. Die wirkliche Dauer des Gigantenstadiums wird eher nach Tausenden von Millionen Jahren zu schätzen sein. Die neueren Theorien haben zwar die eigentliche Quelle der fortgesetzten Strahlung eines Fixsternes noch nicht ermitteln können, aber sie haben wenigstens erwiesen, daß sie in der Kontraktion nicht zu suchen ist, und sie haben darüber hinaus so überraschende und überzeugende Aufschlüsse über die Ursachen einiger der an den Fixsternen beobachteten allgemeinen Tatsachen geliefert, daß man sie als bloße Spekulationen nicht mehr betrachten kann, wenn auch Reserve geboten bleibt.

Neuere Theorien.

Den Anstoß zu der neueren theoretischen Entwicklung gab Schwarzschilds Theorie des Strahlungsgleichgewichtes. Das Prinzip des Strahlungsgleichgewichtes in Anwendung auf eine Gaskugel ist folgendes. Der Energieaustausch im Innern der Kugel findet überwiegend durch Strahlung (nicht durch Leitung oder durch Konvektion) statt. Die aus dem Innern der Kugel aus unbekannter Quelle stammende Energie durchstrahlt die aufeinanderfolgenden Schichten, wird teils von ihnen absorbiert, teils durchgelassen. Der absorbierte Teil bedeutet Energiezufuhr. Außerdem strahlen aber die Schichten auch selbst, sie geben also Wärme ab an die folgenden Schichten. Wie muß nun der Verlauf der Temperatur der aufeinanderfolgenden Schichten sein, damit Zufuhr und Abgabe der Energie sich das Gleichgewicht halten, d. h. damit die Temperatur der Schichten konstant bleibt? Die Theorie ist von Schwarzschild selbst nur auf die Oberfläche der Sonne angewandt worden. Sie wurde dann 1916 von Eddington aufgegriffen und hat in seiner Hand zu sehr bemerkenswerten Ergebnissen geführt. Zunächst zeigte sich allerdings, daß die Theorie des Strahlungsgleichgewichtes allein noch nicht zu einer befriedigenden Theorie des inneren Aufbaues eines Sternes führte, indessen erkannte Eddington, daß der Grund in der Vernachlässigung des Strahlungsdruckes lag, der von der Absorptionskonstanten der Materie im Sterninnern abhängt und der Gravitation entgegenwirkt. Die Eddingtonsche Theorie ist anschaulich von A. Kohlschütter dargestellt und in einer noch nicht veröffentlichten Arbeit noch weiter entwickelt worden. Der Zustand eines Sternes wird bedingt durch Druck, Temperatur und Dichte der Gase in jedem Punkte seines Innern. Die Theorie hat den Verlauf dieser Größen zu bestimmen und daraus Folgerungen abzuleiten, die der Feststellung durch die Beobachtung fähig sind. Die drei Bestimmungsgrößen erfordern drei voneinander unabhängige Gesetze oder Gleichungen, die in die Theorie einzuführen sind. Als erstes Gesetz kommt das Gesetz des mechanischen Gleichgewichtes in Betracht, d. h. der auf jedes Massen-

Prinzip des Strahlungsgleichgewichtes.

Ausbau der Theorie des Strahlungsgleichgewichtes. Strahlungsdruck.

element infolge der Gravitation durch die über ihm lagernde Massensäule ausgeübte Druck muß gleich sein dem inneren Gasdruck plus dem Strahlungsdruck. Das zweite zu verwendende Gesetz ist eine Zustandsgleichung der Gase. Hier ist nun gleich zu unterscheiden zwischen den dichten Zwergsternen und den Riesensternen sehr geringer Dichte. Nur in letzteren kann der Zustand eines idealen Gases näherungsweise erreicht sein, für welche die einfache Zustandsgleichung: Druck des Gases proportional seiner Temperatur und Dichte, gilt. Für größere Dichte kann die genauere van der Waalssche Zustandsgleichung verwendet werden, jedoch müssen dabei unsichere Annahmen über die Konstanten derselben gemacht werden. Bis dahin unterscheidet sich die neue Theorie nicht wesentlich von der älteren. Neu ist nur das dritte Gesetz, das an Stelle älterer Annahmen gesetzt wird, nämlich das oben formulierte Prinzip des Strahlungsgleichgewichtes, modifiziert durch den Strahlungsdruck. Von wesentlicher Bedeutung ist nun bei der Durchführung der Theorie die Annahme über den Massenabsorptionskoeffizienten und über das Molekulargewicht der Gase, endlich über die Verteilung der Energiequellen im Innern des Sternes. Der Absorptionskoeffizient wird als konstant innerhalb des Sternes und von Stern zu Stern angenommen; bezüglich des Molekulargewichtes werden der Reihe nach die Werte 54 und 18 und schließlich, mit Rücksicht auf den sehr wahrscheinlich vorhandenen weitgehenden Dissoziationszustand der Gase im Innern eines Sternes der Wert 2.8 durchgerechnet. Beabsichtigt war der Wert 2, infolge eines Versehens ist jedoch in Wirklichkeit der Wert 2.8 zugrunde gelegt. Kohlschütter rechnet mit dem Wert 2. Für die pro Masseneinheit im Innern des Sternes entstehende Energie wird ebenso wie für den Absorptionskoeffizienten ein konstanter, d. h. vom Ort im Stern unabhängiger Mittelwert eingeführt. Die letztere Annahme bedeutet zwar bis zu einem gewissen Grade Verzichtleistung auf die Kenntnis des Verlaufes der Zustandsgröße im Sterninnern, aber auf diese kommt es vorläufig weniger an als auf die Folgen der Theorie, die sich auf den ganzen Stern beziehen und die allein der Beobachtung zugänglich sind. Der Aufbau eines Sternes wird nun zunächst für einen Stern geringer Dichte, einen Giganten, für den die Theorie strenger und mit einem geringeren Aufwand an mehr oder weniger unsicheren Voraussetzungen durchgeführt werden kann, ermittelt. Der von Eddington gewählte Normalstern hat die mittlere Dichte 0.002 des Wassers, die effektive Temperatur 6500° und die Masse 1.5 (Sonnenmasse $= 1$). Für die Molekulargewichte 2 und 54 ergibt sich der Absorptionskoeffizient zu 5 bzw. 30 CGS-Einheiten, beides physikalisch plausible Werte; es soll aber nur die erstere Annahme weiterverfolgt werden. Für den Normalstern ergab sich im Mittelpunkt die Dichte zu $^1/_9$ des Wassers, der Druck zu 20 Millionen Atmosphären, die Temperatur zu 5 Millionen Grad. Halbwegs vom Mittelpunkt zum Rande beträgt die Temperatur noch $^1/_4$ des Höchstwertes. Die Änderung der Temperatur beim Fortschreiten vom Mittelpunkt zum Rande beträgt nirgends mehr als $1^1/_2{}^0$ pro Kilometer.

Aufbau der Sterne geringer Dichte.

Das Verhältnis von Strahlungsdruck zur Gravitation, das nur von der Masse des Sternes abhängt (die Temperatur ist durch Masse und Dichte gegeben, ebenso die Gravitation), wächst mit zunehmender Masse zuerst sehr langsam und ist noch für Massen von der Ordnung 10^{33} gr kleiner als 0.1. Dann steigt es plötzlich an und ist für 10^{34} gr bereits 0.8, um dann weiterhin asymptotisch sich der Einheit (für unendlich große Masse) zu nähern. Nun ist zu bedenken, daß, wenn die Gravitation den Strahlungsdruck nur wenig überwiegt, eine kleine äußere Zusatzkraft, z. B. langsame Rotation des Sternes, genügen würde, um seinen Zustand instabil zu machen. Es bedeutet also der Wert 10^{34} gr der Masse gewissermaßen eine Grenze der Existenzmöglichkeit für die Fixsterne. Ist also bei der Entstehung der Sterne hinreichend Masse zur Verfügung gewesen, so werden alle bis höchstens zu dieser Grenze anwachsen, sie also nicht wesentlich überschreiten. Dieses Ergebnis der Theorie steht in bemerkenswertem Einklang mit den Beobachtungsergebnissen, denn alle bisher bestimmten (selbstleuchtenden) Sternmassen sind von der Größenordnung 10^{33} bis 10^{34} gr. Hiermit erklärt sich, daß unter den Fixsternen bisher im allgemeinen keine Massen gefunden werden, die 40 Sonnenmassen übersteigen, und daß in den Fällen anscheinend größerer Massen, wie bei den planetarischen Nebeln und einigen Wolf-Rayet-Sternen, Anzeichen von Instabilität sich bemerkbar machen. Daß auch andererseits keine Massen unter den selbstleuchtenden Fixsternen gefunden wurden, die erheblich kleiner als die Sonnenmasse sind, konnte bereits von den älteren Theorien erklärt werden. Der Energievorrat kleiner, sich kontrahierender Massen ist zu gering, um eine sehr hohe Temperatur zu erzeugen. Ein Stern mit großer Masse wird im Verlauf seiner Entwicklung eine höhere Temperatur, d. h. einen „früheren" Spektraltypus erreichen als ein Stern kleiner Masse, der es vielleicht nur bis zum Typus K oder M bringt.

Dies leitet die Aufmerksamkeit auf die Beziehungen zwischen Masse, Dichte und effektiver Temperatur der Sterne. Die Theorie ergibt Proportionalität zwischen der effektiven Temperatur einerseits, der 3. Wurzel aus der Masse und der 6. Wurzel aus der mittleren Dichte andererseits. Die Beziehung zwischen der Temperatur und der Dichte ist von der Annahme über das Molekulargewicht (und von der Masse) unabhängig. Die Beziehung zwischen Temperatur und Masse läßt sich wegen der geringen Verschiedenheit und kleinen Zahl der bekannten Massen astronomisch nicht prüfen. Die durchschnittlichen Dichten in der Gigantenserie in Abhängigkeit vom Spektraltypus oder der effektiven Temperatur gehen nach Russell von 0.00004 für den Typus M bis 0.1 für den Typus A. Dies entspricht einem Temperaturverhältnis von 1:3.7, sehr nahe dem wirklich beobachteten Werte.

Aus der Theorie folgt weiter, daß die absolute Helligkeit eines Riesensternes nur von seiner Masse, nicht von seiner Dichte und seiner effektiven Temperatur (seinem Spektraltypus) abhängt. Mit anderen Worten, der Helligkeitsgewinn durch die Zunahme der Temperatur im Verlauf der Entwick-

lung des Sternes wird durch den Helligkeitsverlust infolge der Verminderung der Oberfläche durch Kontraktion nahezu kompensiert: die absolute Helligkeit ist im aufsteigenden Ast der Lockyer-Hertzsprung-Russellschen Entwicklungskurve nahe konstant, was natürlich nicht allzu wörtlich zu nehmen ist. Dies Ergebnis gilt nicht für einen Stern des absteigenden Astes, für einen dichten Zwergstern; seine Helligkeit muß, da Temperatur und Oberfläche nun im gleichen Sinne sich ändern, um so schneller abnehmen. Es kann nicht geleugnet werden, daß die heute von zahlreichen Astronomen vertretene Anschauung von einer auf- und absteigenden Entwicklung der Sterne, so große Bedenken ihr auch sonst noch entgegenstehen, durch die neuere Strahlungstheorie eine starke Stütze gewonnen hat. Es darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß die Theorie infolge der Unsicherheit, die bezüglich der Zahlenwerte der erwähnten Konstanten herrscht, noch nicht zwingend genug ist, um jede Möglichkeit nur zufälliger guter Übereinstimmung mit den Beobachtungsergebnissen auszuschließen. Außerdem sind insbesondere bezüglich der Zuverlässigkeit der Dichtebestimmungen der absolut hellen Sterne noch erhebliche Zweifel möglich, worüber im Früheren das Nötige bereits gesagt wurde.

Aufbau der Sterne großer Dichte.

Die Ausdehnung der Betrachtungen auf die dichteren Sterne, deren Zustand nicht mehr als der eines idealen Gases angenommen werden kann, ist mit weiterer Einbuße an Strenge verbunden. Von Eddington wurde die van der Waalssche Zustandsgleichung zugrunde gelegt und außer dem Normalstern die Sonne zur Konstantenbestimmung herangezogen. Mit der früheren Festsetzung des Molekulargewichtes ergibt sich die Konstante der maximalen Dichte in der Zustandsgleichung zu 3.9. Das Temperaturmaximum oder der „früheste“ Spektraltypus wird je nach der Masse bei Dichten zwischen 0.2 und 0.4 erreicht: je größer die Masse, desto größer die Dichte der maximalen Temperatur. Die folgende Tabelle gibt nach Eddington die Massen, die nötig sind, damit eine bestimmte Temperatur, ein bestimmter Spektraltypus, von dem Stern im Verlauf seiner Entwicklung erreicht wird.

Mindestmasse (Sonne = 1)	Effektive Temperatur	Ungefährer entsprechender Spektraltypus
4.0	15000°	Oe 5
2.5	14000	B
1.8	12000	B
1.2	10000	A
0.8	8000	F
0.46	6000	G
0.29	4500	K
0.14	3000	M

Aus dieser Übersicht geht hervor, weshalb unter den selbstleuchtenden Sternen Massen, die kleiner als $^1/_{10}$ der Sonnenmasse sind, nicht gefunden werden; so kleine Massen erreichen niemals eine hinreichende Leuchtkraft, um uns sichtbar zu werden. Ferner ist aus der Tabelle abzulesen, daß die höchste effektive Temperatur, die die Sonne jemals erreicht hat, 9000° be-

trägt und daß sie damals der Spektralklasse A angehörte. Ihre gegenwärtige Temperatur ist bekanntlich 6000°. Endlich erklärt sie die durchschnittlich großen Massen der B-Sterne; die theoretischen stimmen auch numerisch gut mit den durch die Beobachtung ermittelten überein. Eddington berechnet noch die Unterschiede der absoluten Helligkeiten der Riesen und Zwerge des Typus M und findet für die letzteren $+10.6^m$ bis $+9.5^m$, wenn die Masse von 0.2 bis 3.0 variiert wird, für die ersteren $+4.3^m$ bis -0.7^m für die Massen 0.5 bis 4.5. Nach der spektroskopischen Methode der Bestimmung der absoluten Helligkeit fand Adams für 10 Zwerge und 48 Riesen $+10.7^m$ bis $+9.8^m$ bzw. $+3.4^m$ bis -1.0^m.[155])

Theorien über Veränderliche und Neue Sterne.

2. Theorien über Veränderliche und Neue Sterne. Da in der Theorie der Bedeckungsveränderlichen, deren Helligkeitsschwankungen eine einfache geometrische Erklärung finden, in neuerer Zeit prinzipielle Fortschritte nicht gemacht worden und auch wohl nicht mehr zu erwarten sind, so kann sie hier um so mehr außer Betracht bleiben, als jede gemeinverständliche Astronomie das Nötige über sie bringt. Das Problem der Bedeckungsveränderlichen kann in der Hauptsache als erledigt gelten. Anders steht es um die Erklärung der Erscheinungen, die die physischen Veränderlichen und die Neuen Sterne darbieten. Hier hat noch keine Theorie den entschiedenen Sieg errungen, aber von Tag zu Tag lichtet sich das Dunkel mehr, das über diesen rätselhaften Himmelskörpern lagert. Man hat vor allem das Problem der δ Cephei-Sterne und ihrer Verwandten in Angriff genommen, in dem sicheren Gefühl, daß mit ihm die anderen Probleme, die der Mira-, U Geminorum-, R Sagittae- und μ Cephei-Sterne, von selbst fallen werden. Auch das Problem der Neuen Sterne ist anscheinend nicht mehr fern von seiner endgültigen Lösung.

Das δ Cephei-Problem.

Unter den heute noch ernstlich in Betracht kommenden Theorien über die δ Cephei-Sterne sind drei Hauptklassen zu unterscheiden, die aber unter sich mancherlei Beziehungen besitzen: Fleckentheorien, Eruptionstheorien, Pulsationstheorien. Den Fleckentheorien und einer der beiden Eruptionstheorien liegt teils die Anschauung zugrunde, daß die δ Cephei-Sterne enge Doppelsterne sind, deren Umlaufszeit gleich der Periode des Lichtwechsels ist, teils die Anschauung, daß sie einfache Sterne sind, deren Rotationsperiode gleich der Lichtwechselperiode ist oder in einem ganzzahligen Verhältnis zu ihr steht. Der Pulsationstheorie im eigentlichen Sinne sowie einer der Eruptionstheorien, die ersterer sehr nahe steht, liegt die Anschauung zugrunde, daß die δ Cephei-Sterne einfache Sterne sind, deren Rotationsperiode in keinem wesentlichen Zusammenhang mit dem Lichtwechsel steht.

Fleckentheorien.

Gyldén (1880) und Bruns (1881) hatten bereits den analytischen Nachweis geliefert, daß jede beliebige, stetig und periodisch verlaufende Lichtkurve durch beliebig viele Helligkeitsverteilungen auf der Oberfläche eines rotierenden Himmelskörpers hervorgebracht werden kann. Offenbar ohne Kenntnis dieser älteren Arbeiten hat Russell 1906 diesen Beweis nochmals erbracht, wobei er jedoch auf die Einschränkung aufmerksam macht, die der

Beweis in der Wirklichkeit durch gewisse physikalische Forderungen (insbesondere Ausschluß negativer Helligkeiten) erfährt. Auf diesen Punkt hatte aber bereits lange vorher Seeliger hingewiesen. Nimmt man jedoch einen mehr oder weniger starken Helligkeitsabfall nach dem Rande der Sternscheibe infolge Absorption des Lichtes in der Sternatmosphäre an, wie er ja auf der Sonne beobachtet wird, ferner, was aus spektralen Gründen wahrscheinlich ist, daß das Licht des helleren Oberflächengebietes infolge verminderter Absorption aus tieferen Schichten stammt als das Licht der dunkleren Teile, so kann man unter plausibelen physikalischen Annahmen sämtliche beobachteten, sicher festgelegten Lichtkurven darstellen. Die Schwierigkeit wurde hauptsächlich darin empfunden, daß es nicht zu gelingen schien, mit plausibelen Annahmen über die Helligkeitsverteilung auf der Sternoberfläche den extrem steilen Anstieg der Helligkeit vom Minimum zum Maximum in den Lichtkurven der Antalgolsterne zu erklären. Experimentelle Versuche haben aber diese Möglichkeit dargetan. Soweit kommt die Frage, ob die δ Cephei-Sterne Doppelsterne oder einfache sind, noch gar nicht in Betracht.

Der Zusammenhang zwischen Lichtwechsel und Radialgeschwindigkeitsschwankung. Deutungen der letzteren.

Erst die innige Beziehung zwischen Lichtkurve und Geschwindigkeitskurve, wie sie bei den δ Cephei-Sternen beobachtet wird, zwingt dazu, sich klarzumachen, in welchem physischen Zusammenhang der Lichtwechsel mit der Radialgeschwindigkeitsschwankung steht. Die ursprüngliche Anschauung geht dahin, diese Schwankung ohne weiteres als eine elliptische Bahnbewegung zu interpretieren, wobei sich dann die schon früher berührte Schwierigkeit der Einordnung der δ Cephei-Sterne in die übrigen spektroskopischen Doppelsterne ergibt. Auf Grund der Doppelsternannahme muß man sich vorstellen, daß der schwächere, bei den eigentlichen δ Cephei-Sternen im Spektrum stets unsichtbare Begleiter die meteorologischen Verhältnisse der Atmosphäre der helleren Komponente in der Weise beeinflußt, daß eine dem Lichtwechsel entsprechende Helligkeitsverteilung auf der Oberfläche derselben zustande kommt. Die Radialgeschwindigkeiten werden durch teils beständige, teils unbeständige Konvektionsströmungen in der Atmosphäre verändert, so daß eine systematisch verfälschte, zuweilen auch stark veränderliche Bahnbewegung beobachtet werden muß. Mit den Veränderungen der scheinbaren Bahnbewegung müssen natürlich auch Veränderungen der Lichtkurve einhergehen. Alles dies entspricht der wirklichen Erfahrung. Es erhebt sich nun die Vermutung, ob nicht die ganze beobachtete Schwankung der Radialgeschwindigkeit von Konvektionsströmungen in der Sternatmosphäre allein herrührt. Diese Vermutung erhält manche Unterstützung durch eigentümliche, in den letzten Jahren aufgefundene Fälle (12 Lacertae, γ Lyrae u. a.). In der Tat gelangt man durch die Annahme, daß über dem hellen Oberflächengebiet vorwiegend aufsteigende, über dem dunkeln vorwiegend absteigende Gasströme herrschen, ebenfalls zu einer vollkommenen Darstellung der beobachteten Geschwindigkeiten und ihrer engen Beziehungen zu den Lichtkurven, sowie zu einer zwanglosen Erklärung mancher anderen

spektralen Eigentümlichkeiten der δ Cephei-Sterne. Indessen gibt es einige Fälle (in denen allerdings die Lichtkurve nicht den reinen δ Cephei-Charakter besitzt, sondern aus mehreren Wellen besteht), die sehr entschieden zugunsten der Doppelsternannahme sprechen, indem bei ihnen die zweite Komponente ihr Dasein durch ihre Linien im Spektrum verrät (o Persei, ζ_1 Ursae majoris, Boss 46 u. a.). Abgesehen davon würde es auch schwierig sein, eine plausibele Ursache der ungleichförmigen Helligkeitsverteilung zu finden, die ja bei sehr vielen Sternen nicht vorhanden zu sein scheint. Eine eigentümliche, aber durch manche Beobachtungen gestützte Folgerung der entwickelten Anschauungen ist die, daß die Periode des Lichtwechsels nicht notwendig gleich der Periode der Bahnbewegung oder der Rotation zu sein braucht, sondern $\frac{1}{n}$ derselben sein kann, wo n eine kleine ganze Zahl bedeutet. Dieselbe Folgerung gilt für die spektroskopische Periode. Vielleicht sind so die aus mechanischen Gründen unwahrscheinlich kurzen Perioden und der veränderliche Charakter der Geschwindigkeitskurven einiger spektroskopischen Doppelsterne zu erklären.

Eruptionstheorien.

Von den Eruptionstheorien setzt eine, die von Hagen in jüngster Zeit aufgestellt worden ist, ebenfalls ein Doppelsternsystem voraus, während die andere, von Jeans, die Frage nach der Ursache der Eruptionen offen läßt. Die Jeanssche Theorie schließt sich eng an die Pulsationstheorie an und soll mit dieser zugleich betrachtet werden. Hagen nimmt an, daß der Begleiter im Periastron auf dem Hauptstern eine Eruption hervorruft. Damit ist natürlich jede beliebig stark asymmetrische Lichtkurve erklärbar. Die Häufung der Periastronlängen ω um den Wert 90° würde sich mit dieser Annahme zwanglos dadurch erklären, daß die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung des Lichtwechsels am größten ist, wenn das Periastron zur Gesichtslinie so liegt, daß der Lichtausbruch gerade auf der uns zugewandten Seite des Hauptsternes stattfindet, d. h. wenn eben $\omega = 90^0$ ist. Es ist bemerkenswert, daß es spektroskopische Doppelsterne ohne merkliche Helligkeitsschwankungen gibt, die sonst alle charakteristischen Eigenschaften der δ Cephei-Sterne aufweisen mit der alleinigen Ausnahme, daß ω sehr verschieden von 90° ist. Dieser Umstand kann offenbar aber auch zugunsten der zuerst entwickelten Anschauungen gedeutet werden.

Pulsationstheorien.

Seit 1913 hat man, veranlaßt durch die Schwierigkeiten, die sich der Doppelsternannahme entgegenstellten, versucht, diese Annahme ganz zu verlassen und die δ Cephei-Sterne als einfache Sterne zu betrachten, die als Gaskugeln freie (nicht erzwungene) Eigenschwingungen oder Pulsationen vollführen. Diese Pulsationen bestehen in periodisch sich wiederholenden Kontraktionen und Expansionen des ganzen Sternes, also in periodischen Schwankungen des Volumens, der Oberfläche, und eventuell der Form. Die Möglichkeit solcher Schwingungen um einen Gleichgewichtszustand ist für Gaskugeln theoretisch nachgewiesen. Ihre Schwingungsperiode hängt für polytrope Gaskugeln nur von der Dichte der Gaskugel, nicht von ihrer

Größe ab; sie ist umgekehrt proportional der Wurzel aus der Dichte und aus der Ordnung der Kugelfunktion, nach der die Kugeloberfläche deformiert wurde. Die Hauptschwingung ist die der zweiten Ordnung; einmal angeregt, kann sie durch längere Zeiträume hindurch sich erhalten, ohne durch Reibung zerstört zu werden. Für Sonnendichte würde die Periode von der Größenordnung 2 Stunden sein. Den ersten Anstoß gab 1913 eine spektroskopische Untersuchung von Ludendorff, in der dieser starke Zweifel an der Doppelsternnatur der δ Cephei-Sterne aussprach. Bald darauf empfahl Plummer die Anwendung der Pulsationstheorie auf diese Veränderlichen. Diese ist dann in sehr eingehender und geschickter Weise von Shapley durchgeführt und von Eddington unter Anlehnung an seine Strahlungstheorie theoretisch behandelt worden. Gerade die Eigenschaft, einer weitgehenden mathematischen Behandlung zugänglich zu sein, hat der neuen Theorie viel Anhänger erworben, trotz ihrer etwas künstlichen und gewaltsamen physikalischen Vorstellungen.

Shapley nimmt nun weiter an, daß die Pulsationen von Eruptionen begleitet sind, damit ungefähr Gleichzeitigkeit zwischen Helligkeitsmaximum und negativem Maximum der Geschwindigkeit, wie in der Regel, jedoch nicht ausnahmslos, beobachtet, erzielt wird. Eddington behält die reine Pulsationstheorie bei, und es gelingt ihm nicht, die Verspätung des beobachteten Helligkeitsmaximums um $^1/_4$ der Periode gegen die Zeit der stärksten Kompression, wo die Temperatur am höchsten sein muß, hinreichend zu erklären. Er hat seine Analyse auf eine im Innern adiabatische Gaskugel angewandt und nimmt an, daß die Verspätung durch die äußeren nichtadiabatischen Schichten verursacht werde. Im übrigen liefert die Theorie eine sehr befriedigende Erklärung für eine Reihe von charakteristischen Eigenschaften der δ Cephei-Sterne, insbesondere für die Abhängigkeit der Periodenlänge vom Spektraltypus (d. h. der Dichte), für die absoluten Werte der Perioden, die asymmetrische Form der Lichtkurven. Die Amplituden der Pulsationen betragen zwischen 5% und 11% des Radius. Wenn die Kontraktion die alleinige Quelle für die Strahlungsenergie wäre, so müßten sich die Perioden der δ Cephei-Sterne in leicht meßbarem Grade verkürzen. Da dies in Wirklichkeit nicht der Fall ist, so folgt auch aus dieser Betrachtung, daß noch andere Energiequellen vorhanden sein müssen.

Jeans, der gegen Eddingtons Theorie verschiedene Einwände zu erheben hat, nimmt seinerseits Explosionen an, die auf einem rotierenden einfachen, ellipsoidischen Stern jedesmal bei derselben Rotationsphase auftreten, womit eine Darstellung der Lichtkurve erzielt werden kann, fürchtet aber selbst, daß seine Theorie mit den spektroskopischen Beobachtungen in Konflikt geraten werde. Eine plausible Ursache für die periodischen Explosionen, die man wohl als erzwungene Schwingungen betrachten muß, versucht er nicht zu geben.

Ellipsoidtheorie

Schließlich ist noch eine eigentümliche, der zuerst skizzierten Flecken-theorie nahestehende Theorie zu erwähnen, die in jüngster Zeit von Bott-

linger aufgestellt worden ist. Dieser nimmt auch einen einfachen Stern an; derselbe soll ein Jacobisches Ellipsoid sein, das so stark verlängert ist, daß es an der Grenze der Stabilität sich befindet. Infolgedessen lösen sich an den beiden Enden der großen Achse, wo die Gravitation am kleinsten ist, beständig Gasmoleküle vermöge ihrer molekularen Eigengeschwindigkeit ab und fallen in ellipsenähnlichen Bahnen rückwärts (relativ zur Rotationsrichtung des Ellipsoids) auf halbem Wege zwischen den beiden Achsenenden auf die Oberfläche zurück. Hierdurch entsteht eine Helligkeitsverteilung und eine Deformation der Oberfläche, die die beobachteten Lichtkurven und Geschwindigkeitskurven darzustellen vermögen. Man sieht, daß diese Annahme zwei gleiche oder ungleiche Maxima und Minima während einer Umdrehung zur Folge hat, wofür die meisten δ Cephei-Sterne keinen Anhalt liefern. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, muß das Jacobische Ellipsoid durch eine Poincarésche Birnenfigur ersetzt werden.[156])

Theorien über die Neuen Sterne.

Bezüglich der Neuen Sterne sind die Ansichten heute weniger geteilt. Über das Phänomen des Aufleuchtens selbst haben die spektroskopischen Forschungen der letzten Jahre so weitgehende Aufschlüsse erbracht, daß man über seine wahre Natur kaum mehr im Zweifel sein kann. Mehr dagegen gehen die Meinungen über die eigentliche Ursache des Aufleuchtens auseinander.

Die Ansicht, daß das Aufleuchten der Neuen Sterne auf gewaltige Eruptionen, auf Protuberanzen im größten Ausmaße zurückzuführen sei, ist bereits von Zöllner 1865 geäußert worden, sicherlich hat man sich aber schon früher eine ähnliche Vorstellung von dieser Erscheinung gebildet. Sie hat im wesentlichen den Wandel der Zeiten bis heute überdauert, wenn auch im einzelnen, besonders hinsichtlich der Konstitution des von der Katastrophe betroffenen Weltkörpers, die neuere Forschung zu wesentlich modifizierten Anschauungen geführt hat. Auch die Ansichten von Vogel (Zusammenstoß oder starke Annäherung zweier Weltkörper), Seeliger (Eindringen eines Sternes in eine kosmische Wolke und Erhitzung durch Reibung), Lohse (chemische Wärmeprozesse), Klinkerfues-Wilsing (ähnlich der Ansicht von Vogel, starke Gezeitenwirkung in der Atmosphäre eines Sternes durch Annäherung eines anderen) usw. arbeiten mehr oder weniger mit Eruptionen. In der Tat sprechen die spektroskopischen Befunde, die früher auseinandergesetzt wurden, eine unwiderlegliche Sprache zugunsten dieser Anschauung. Es sollen die beobachteten Erscheinungen an Hand derselben kurz interpretiert und dann Seeligers Vorstellungen über die Ursache der Eruption skizziert werden.

Zunächst noch eine Vorbemerkung. Die wachsende Häufigkeit der Entdeckungen Neuer Sterne läßt immer klarer erkennen, daß diese Objekte keineswegs solche Ausnahmeerscheinungen in der Fixsternwelt sind, wie man früher glaubte. Nach allervorsichtigster Schätzung muß man die Zahl der jährlich in der Milchstraße aufleuchtenden Neuen Sterne, die im Maximum die 10. Größe oder mehr erreichen, zu mindestens 2 annehmen; wahr-

scheinlich ist sie jedoch beträchtlich größer. Vergleicht man aber diese Zahl mit der Gesamtzahl der unserer Beobachtung zugänglichen Sterne überhaupt, so möchte man vermuten, daß solche Katastrophen etwas durchaus Normales und Notwendiges im Entwicklungsgang eines Sternes bedeuten. Nebenbei bemerkt, kann dann eine statistische Vergleichung der Zahl der Neuen Sterne in der Milchstraße mit der in den Spiralnebeln vielleicht dazu dienen, die kosmische Rangordnung der letzteren zum System der Milchstraße zu erkennen, wenn man voraussetzen darf, daß das Verhältnis der Novae zur Gesamtzahl der Sterne eines Komplexes im ganzen zugänglichen Weltraum als konstant anzusehen ist.

Deutung der spektralen Erscheinungen.

Die spektralen Erscheinungen lassen folgendes erkennen. Von dem Stern erheben sich zu Beginn der Katastrophe in einer oder mehreren Eruptionen gewaltige Gasmassen, die sich in der Umgebung desselben ausbreiten und, unterstützt durch die Rotation des Sternes, diesen alsbald vollständig einhüllen. Die schon zu Anbeginn große Geschwindigkeit der emporgeschleuderten Massen nach außen wächst unter dem Einfluß des Strahlungsdruckes zu ungeheuren Beträgen an, sie beschleunigt die völlige und spurlose Zerstreuung derselben im Weltraum. Wahrscheinlich treten dabei auch Kondensationen ein. Diejenigen Gasmassen, die sich auf die Sternscheibe und deren intensiv leuchtende nächste Umgebung projizieren, erzeugen die stets stark nach Violett verschobenen, verhältnismäßig schmalen Absorptionslinien. Von den außerhalb der Sternscheibe auf den dunklen Himmelsgrund sich projizierenden Gasmassen dagegen rühren die breiten, im Mittel wenig verschobenen Emissionsbänder her. Die geometrischen Verhältnisse sind ohne weiteres zu übersehen. Mehrere Sätze von Linien mit verschiedener Geschwindigkeit und von verschiedener Breite und Schärfe rühren von mehreren, zeitlich nicht zusammenfallenden Eruptionen her. Ruhende scharfe Linien werden von stark verdünnten Gasmassen in der weiteren Umgebung des Sternes erzeugt, die ursprünglich vielleicht von dem Stern ausgestoßen worden sind und ihre Geschwindigkeit verloren haben, vielleicht aber auch gar nicht von dem Stern herrühren, was für Seeligers Theorie in Betracht kommt. Das Spektrum der Novae ist in jedem bisher der Beobachtung zugänglich gewesenen Stadium wesentlich das der ausgestoßenen Gas- und anderen Massen. Die periodischen Helligkeitsschwankungen werden am zwanglosesten durch die Rotation der ungleichmäßig hellen mittleren Masse hervorgerufen. Auch Pulsationen werden zur Erklärung herangezogen. Ob das schließlich auftretende Wolf-Rayet-Spektrum das des eigentlichen Sternes ist, kann nicht beurteilt werden, bevor nicht von einer Nova das Spektrum vor dem Ausbruch bekannt ist. Die an den Nebeln um die Nova Persei beobachteten Erscheinungen sind bereits früher interpretiert worden. Erwähnt sei nur noch eine Ansicht von Wilsing und Newcomb, nach der die Bewegungen dieser Nebel wirkliche sind und von einer von der Nova ausgeübten Repulsivkraft (Strahlungsdruck) herrühren.

Seeligers Theorie der Novae.

Das Charakteristische von Seeligers Theorie ist die Erklärung der

Eruptionen als Folge des Eindringens des Sternes in eine kosmische Wolke (Gas- oder Staubmassen), wodurch eine Wirkung erzeugt wird, die in kleinem Maßstabe täglich an den in die Erdatmosphäre eindringenden Meteoren zu beobachten ist. Die Analogie zwischen beiden Erscheinungen geht so weit, daß auf photographischem Wege auch bei den Sternschnuppen periodische Helligkeitsschwankungen festgestellt wurden. Auf diese Analogie hat Ebert hingewiesen. Da die Photographie das Vorhandensein von Nebel- oder Staubmassen im Weltraum nachgewiesen hat und solche Massen tatsächlich in der Umgebung der Nova Persei festgestellt werden konnten, so ist nicht zu leugnen, daß die Seeligersche Anschauung viele Wahrscheinlichkeit für sich hat. Es läßt sich allerdings nicht leicht mit ihr der Eindruck vereinigen, daß das Novastadium eine normale Entwicklungsstufe im Leben eines Sternes darstellt.[157])

Theorien über die Gasnebel.

3. Theorien über die Gasnebel. Zwei Fragen sind es hauptsächlich, die hier im Vordergrund des Interesses stehen, die Frage nach der Art und Quelle der Strahlung der Gasnebel und die Frage nach der Herkunft der Nebellinien, soweit sie nicht mit Linien bekannter Elemente identifiziert sind. Besonders die letzte Frage ist von großer physikalischer Bedeutung, da vermutlich in den Gasnebeln die Materie in einem stark dissoziierten, primitiven Zustande sich befindet. Die Frage nach der kosmogonischen Stellung der Gasnebel muß hier außer Betracht bleiben.

Quelle der Strahlung.

Das Leuchten der Gase und Dämpfe wird nach der herrschenden Ansicht der Physiker nicht von der Temperatur allein bedingt. Durch bloße Zufuhr von Wärme, ohne daß dadurch zugleich eine andere Art der Anregung der Emission (z. B. Änderungen im Aufbau des Atoms) ausgelöst wird, kann ein Gas nicht zur Strahlung veranlaßt werden. Andererseits kann ein Gas, z. B. durch elektrische Anregung allein, ohne merkliche Temperaturerhöhung, zum Leuchten gebracht werden. Dies würde auch bezüglich der Strahlung der gasförmigen Fixsterne zu beachten sein, obwohl es keinem Zweifel unterliegt, daß ihre Temperatur eine außerordentlich hohe ist und daß ihre Wärmeenergie die letzte bisher feststellbare Quelle ihrer Strahlung ist. Diese Quelle kann man aber bei den ausgedehnten Gasnebeln nicht als vorhanden annehmen, denn es ist ganz undenkbar, daß diese Gebilde von unvorstellbar geringer Dichte eine erheblich höhere Temperatur besitzen sollten als der Raum, in dem sie sich befinden. Die früher erwähnte Temperaturbestimmung des Orionnebels bezieht sich auf den dichtesten Teil des Nebels in der Nähe der Trapezsterne, und sie beruht auf der Annahme, daß die symmetrische Verbreiterung der Linien, die bei ruhendem Atom monochromatisch sein müßten, allein von Wärmebewegungen der Atome oder Moleküle gemäß der kinetischen Gastheorie herrühren. Die Verbreiterung kann aber sehr wohl zum Teil auch instrumentellen Ursprungs sein, mit welcher Möglichkeit auch die Beobachter selbst rechnen.

Die Schwierigkeit, sich eine anschauliche Vorstellung von dem Zustandekommen des Leuchtens eines Gasnebels zu bilden, verschwindet größtenteils,

wenn man den Vorgang der Emission atomistisch betrachtet. Sitz der Emission sind die einzelnen Atome des Gases, soweit sie in emissionsfähigem Zustande sich befinden. Worin dieser Zustand besteht, muß hier unerörtert bleiben. Über die letzte Quelle der Strahlungsenergie wissen wir bei den Nebeln so wenig Sicheres wie bei den Fixsternen.

Untersuchungen über die Herkunft der nicht identifizierten Nebellinien

Die Vermutung, daß die noch nicht identifizierten Nebellinien vielleicht gar keinem unbekannten Gase angehören, sondern unter gewissen, noch unbekannten Bedingungen von einem oder mehreren der bekannten Gase, etwa Wasserstoff oder Helium, emittiert werden, hat bisher keine experimentelle Stütze gefunden. Vielmehr ist es Nicholson in den letzten Jahren auf Grund der modernen Vorstellungen über den Bau des Atoms und den Vorgang der Emission, jedoch auf anderem Wege als dem von Bohr beschrittenen, gelungen, fast alle unbekannten Nebellinien (neben anderen in den O-Sternen und in der Sonnenkorona) theoretisch abzuleiten unter der Voraussetzung, daß sie Gasen mit möglichst einfacher Atomstruktur (sehr geringem Atomgewicht) angehören. Es gelingt ihm zunächst, wichtige bis dahin nicht identifizierte Nebellinien mit Ausnahme der Linien 4686, 4068.8 und 3729 durch einfache Atommodelle mit verschiedenen elektrischen Ladungen darzustellen. Die erste der drei Linien wird jetzt, wie früher erwähnt, dem Helium zugeschrieben. Das unbekannte Gas, dem unter anderen die Linien 5007, 4959 und 4363 angehören, wurde von ihm Nebulium genannt. Sein theoretisches Atomgewicht ist 1.31. Das Atomgewicht des hypothetischen Koronaelementes Protofluor ist 2.0. Nicholsons Ergebnis erhielt eine gewichtige Stütze durch Wolfs Entdeckung der geschichteten Emission in Gasnebeln und durch die nachträgliche Auffindung zweier von ihm vorausgesagter neuer Nebellinien λ 4353 und 6584 in Gasnebeln und O-Sternen, die Wright und Wolf gelang. Eine andere aus der Theorie sich ergebende und von Wolf in den O-Sternen gefundene Linie ist λ 3484, die einem weiteren hypothetischen Gase, Archonium, mit dem Atomgewicht 2.95 zugeschrieben wurde. Die nahe Übereinstimmnng dieses Wertes mit dem des von Bourget, Buisson und Fabry für das Gas der Nebellinie 3729 gefundenen Atomgewichtes (3) ließ vermuten, daß auch die Linie 3729 dem Archonium angehöre. Diese Vermutung wurde durch die Theorie bestätigt und führte weiter zur Identifizierung der Linie 4068.8, die ebenfalls diesem Gase zugeordnet werden konnte.

Für das die charakteristische Nebellinie 3869 erzeugende Gas wurde das Atomgewicht 0.3275, ein Drittel desjenigen des Wasserstoffs, gefunden. Experimentell konnte dies bisher noch nicht nachgeprüft werden.

Das Leuchten der Nebel.

Das Leuchten der Nebel rührt nach Nicholson davon her, daß in ihnen die Elektronen vom Atom leichter als unter den im Laboratorium und den Sternen gegebenen Bedingungen freigelassen werden, so daß ein beständiger Austausch von freien Elektronen stattfindet. Diese bombardieren die Atome und lösen durch die Störung der Atomstruktur die Emission aus. Moleküle (im Gegensatz zum Atom) fehlen in den Nebeln.[158]) —

Die Beschränkung des hier zur Verfügung stehenden Raumes machte es leider nötig, von einer eingehenden Betrachtung sämtlicher Theorien, die auf die Objekte des Fixsternhimmels Bezug haben, abzusehen. Aus diesem Grunde mußten mehr in das Gebiet der Himmelsmechanik fallende, obwohl teilweise von physikalischen Betrachtungen ausgehende Arbeiten, wie die Untersuchungen über die Dynamik der kugelförmigen Sternhaufen und Spiralnebel, die zahlreichen kosmogonischen Betrachtungen usw. außer Betracht bleiben. Aber das Gesagte zeigt schon zur Genüge, wie es einerseits gerade durch die Verwendung der neuesten Ergebnisse der physikalischen Forschung jetzt mehr und mehr gelingt, die überwältigende Fülle der astrophysikalischen Beobachtungsergebnisse zu ordnen und einheitlich zu erklären, und wie andererseits immer wieder der Sternhimmel für den Physiker die große Werkstatt ist, in der sich die physikalischen Vorgänge in einer Großartigkeit abspielen, wie er sie in seinem irdischen Laboratorium niemals zu erreichen vermag.

Literatur.

Die folgenden Literaturnachweise wollen in keiner Weise vollständig sein, sondern dem Interessenten nur einige Fingerzeige geben, vor allem bezüglich der seit dem Beginn des Krieges erschienenen schwer zugänglichen ausländischen Literatur. Folgende Abkürzungen sind gebraucht: A. A. = Astronomy and Astrophysics. A. J. = Astronomical Journal. A. N. = Astronomische Nachrichten. Ap. J. = Astrophysical Journal. A. Ph. = Annalen der Physik. Ait. = AITKEN, The Binary Stars, New York 1918. B. Z. = Beobachtungszirkular der Astron. Nachrichten. C. M. W. = Contributions of the Mt. Wilson Observatory. H. A. = Annalen der Harvard-Sternwarte. H. C. = Harvard Circulars. H. S. = Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie. J. B. A. A. = Journal of the British Astronom. Association. J. C. R. A. S. = Journal of the Royal Astronom. Soc. of Canada. Li. B. = Lick Observatory Bulletin. Lo. B. = Lowell Observatory Bulletin. M. N. = Monthly Notices of the Royal Astronom. Society London. M. R. A. S. = Memoirs of the R. A. S. London. M. Phot. = Müllers Photometrie der Gestirne. N. = Nature (London). N. E. = NEWCOMB-ENGELMANN, Pop. Astronomie, 5. Aufl. Natw. = Die Naturwissenschaften. O. = The Observatory. P. A. = Popular Astronomy. P. A. O. = Publ. Allegheny Observatory. P. A. S. P. = Publ. Astron. Society of the Pacific. P. H. = Publ. des Astrophys. Obs. Heidelberg-Königstuhl. P. L. = Publ. Lick Observatory. P. P. = Publ. des Potsdamer Astrophys. Obs. Ph. T. = Philosophical Transactions. Ph. Z. = Physikalische Zeitschrift. Pr. N. A. Proceedings of the National Academy of Sciences, Washington. Pr. R. S. = Proceedings of the R. Society, London. R. M. W. = Report of the Mt. Wilson Observatory. S. M. = Sidereal Messenger. S. V. = Sammlung Vieweg. Sp. V. = Publ. der Specola Vaticana. V. B. B. = Veröffentl. der Sternwarte Berlin-Babelsberg. V. J. S. = Vierteljahrsschrift der Astron. Gesellschaft. W. A. = Wiedemanns Annalen. Z. I. = Zeitschrift für Instrumentenkunde. Die Zahlen bedeuten in der Regel den Band.

1. M. WOLF A. N. 161; M. N. 64, 68, 69 u. a. BARNARD P. A. 14; Science 25; Ap. J. 25, 31, 41; A. N. 177 u. a. KOPFF P. H. 1. — 2. HARTMANN Ap. J. 19. FROST Ap. J. 29. ADAMS und STRÖMBERG Ap. J. 47 u. a. — 3. LUDENDORFF, GUTHNICK A. N. 209. — 4. M. Phot. 456. — 5. M. Phot. HAGEN Die Veränderlichen Sterne. — 6. Ebenda. — 7. M. Phot., vgl. auch Anm. 12. — 8. ZÖLLNER Photometr. Untersuchungen. MÜLLER M. Phot. und P. P. — 9. H. A. 11, 14, 23, 64, 69. — 10. KAYSER A. N. 57. — 11. M. Phot. — 12. MÜLLER M. Phot.; A. N. 154. ROSENBERG A. N. 172. HARTMANN A. N. 185. GRAFF Z. I. 35. PICKERING, vgl. PARKHURST Researches in Stellar Photometry. — 13. HARTMANN A. N. 185. — 14. SCHOENBERG Publ. Dorpat 1914. — 15. SCHWARZSCHILD Göttinger Aktinometrie. PARKHURST Yerkes Actinometry Ap. J. 36. KING H. A. 59. — 16. CHARLIER Svensk. Vet.-Akad. Handl. 14. Publ. Astron. Gesellschaft 19. — 17. SCHWARZSCHILD Publ. Wien-Ottakring 5. KRON P. P. 22. — 18. ROSENBERG Sirius 53. — 19. CHARLIER l. c. — 20. PARKHURST Ap. J. 36. — 21. WOLF A. N. 126. SCHEINER A. N. 128. — 22. SCHWARZSCHILD l. c. — 23. KRON l. c. — 24. PARKHURST Ap. J. 26, 35. SEARES Ap. J. 38—41 u. a. — 25. SCHWARZSCHILD A. N. 183. — 26. HERTZSPRUNG P. P. 22. — 27. SCHWARZSCHILD A. N. 170, 174; Göttinger Aktinometrie. — 28. BRENDEL V. J. S. 45, 46. — 29. BRILL A. N. 210. — 30. HARTMANN Z. I. 19. — 31. Stereokomparator, WOLF A. N. 157, Naturw. Rundschau 16. — 32. Blinkmikroskop, Z. I. 24, 30. — 33. MINSCHIN Pr. R. S. 58, 59. — 34. STEBBINS Ap. J. 26, 27, 32 ff. — 35. ELSTER und GEITEL Ph. Z. 11, 12, 13 u. a. — 36. Lichtelektrische Sternphotometer MEYER und ROSENBERG V. J. S. 48. STEBBINS Li. B. 277. LINDEMANN M. N. 79. GUTHNICK A. N. 196. GUTHNICK und PRAGER V. B. B. 1, 2. — 37. POHL

und PRINGSHEIM S. V. 1. — 38. NICHOL Ap. J. 13. — 39. PFUND P. A. O. 3. COBLENTZ Bureau of Standards Washington 11. Li. B. 266. P. A. 22. P. A. S. P. 26. — 40. A. Ph. 24, 33. — 41. Thermoelemente, Literatur MÜLLER-POUILLET, Physik, 4 S. 1186. — 42. STETSON Ap. J. 43. — 43. OSTHOFFS Farbenskala Sp. V. 8. — 44. HAGEN Ap. J. 34. Sp. V. 3. — 45. Effektive Wellenlängen, ältere Anregungen von SCHWARZSCHILD, COMSTOCK, PROSPER HENRY, LAU, vgl. HERTZSPRUNG A. N. 182. — 46. LINDBLAD Uppsala Universitets Årsskrift 1920. — 47. V. B. B. 1, 2. A. N. 210. — 48. SEARES Pr. N. A. 2. — 49. VOGEL und MÜLLER Monatsberichte der Akademie Berlin 1880. PICKERING A. N. 128. Spektralphotom. Bestimmung effektiver Temperaturen WILSING, SCHEINER, ROSENBERG, MÜNCH P. P. 19, 24. Acta Leop. Carol. Halle 101. A. N. 193, 204. — 50. P. P. KOCH A. Ph. 39. — 51. ADAMS Ap. J. 33 u. a. — 52. H. A. 26, 27, 28ff. — 53. HERTZSPRUNG A. N. 207. — 54. PICKERING H. A. 26. Ap. J. 31. H. C. 110. SCHWARZSCHILD P. P. 23. — 55. HARTMANN Z. I. 21; Ap. J. 15. — 56. HARTMANN Z. I. 20. WRIGHT Ap. J. 12. Ottawa Reports u. a. — 57. HARTMANNS Dispersionsformel P. P. 12; Z. I. 19. — 58. Spektrokomparator P. P. 18; Ap. J. 24. Z. I. 26. — 59. EDDINGTON Stellar Movements. — 60. Neben der Rev. Harv. Photometry in H. A. 50 hauptsächlich noch H. A. 54 und 74. — 61. Ap. J. 36. — 62. SCHWARZSCHILD Archiv für Optik 1, und zahlreiche weitere Arbeiten, vgl. LINDBLAD, Anm. 46. — 63. SEARES Pr. N. A. 5. LINDBLAD l. c. — 64. WIRTZ V. J. S. 54. LINDBLAD Arkiv f. Mat. 13. PARKHURST Ap. J. 27. SCHWARZSCHILD Gött. Aktin. B. — 65. KING H. A. 59. — 66. SCHWARZSCHILD Gött. Aktin. B. — 67. ADAMS Ap. J. 39. SEARES P. A. S. P. 30. LINDBLAD Arkiv f. Mat. 13 — 68. SEARES Pr. N. A. 5. LINDBLAD vgl. Anm. 46. — 69. VOGEL P. P. 12. CANNON, MAURY H. A. 28, 56. LOCKYER Ph. T. 184; A. N. 149. Spezialuntersuchungen über einzelne Spektraltypen CAMPBELL A. A. 13 und P. L. oder Li. B. HALE, ELLERMAN, PARKHURST Publ. Yerkes Obs. 2 u. a. — 70. ADAMS Pr. N. A. 2. — 71. HERTZSPRUNG A. N. 179. — 72. FOWLER M. N. 73. EVANS N. 1913. PASCHEN A. Ph. 50. — 73. HERTZSPRUNG Zeitschr. f. wiss. Photographie 3, 5; A. N. 179. RUSSELL O. 35. — 74. EDDINGTON O. 36. — 75. LUDENDORFF A. N. 189, 211. — 76. RUSSELL O. 37. — 77. HEPBURN J. B. A. A. 29. ADAMS und JOY Ap. J. 46. SHAPLEY Pr. N. A. 1; Ap. J. 38. ADAMS und JOY C. M. W. 164. — 78. WILSING und SCHEINER, ROSENBERG vgl. Anm. 49. — 79. WILSING ebendort. — 80. ÖPIK Ap. J. 44. BERNEWITZ, noch nicht veröff. — 81. HEPBURN Anm. 77. ÖPIK Anm. 80. Nach BERNEWITZ erhält man für Krüger 60, den Procyonbegleiter u. a. auch mit Spektrum Mb unmöglich hohe Dichten. — 82. ADAMS und KOHLSCHÜTTER Pr. N. A. 1. Ap. J. 46. — 83. HERTZSPRUNG A. N. 179. — 84. ADAMS und KOHLSCHÜTTER Ap. J. 39. — 85. Dieselben Ap. J. 40. ADAMS Pr. N. A. 2. ADAMS und JOY Ap. J. 46. — 86. HARTMANN Ph. Z. 18. KOHL, Astr. Mitt. Göttingen 16. DEBYE Ph. Z. 18. HUGGINS An Atlas of representative stellar spectra. — 87. FABRY und BUISSON Ap. J. 31. EVERSHED Kodaikanal Bull. 1914. — 88. Für eingehende Information: Ait. Ferner CAMPBELL Li. B. 181. LUDENDORFF V. J. S. 45 ff. Literar. Beibl. der A. N. 50. Veröffentlichungen der Sternwarte Ottawa. Li. B., Ap. J. u. a. — 89. PAVEL und BERNEWITZ A. N. 211. — 90. κ Pegasi Li. B. 9. — 91. EDDINGTON M. N. 77, vgl. auch Abschnitt IV dieses Artikels. — 92. LUDENDORFF A. N. 189, 211. — 93. Ait. — 94. Ait. EDDINGTON Stellar Movements. INNES South African Journ. of Science 1916. STEELE P. A. 1917. — 95. CAMPBELL Li. B. 181. SCHLESINGER und BAKER P. A. O. 1. LUDENDORFF A. N. 184. JORDAN P. A. O. 3. Ait. — 96. POOR A. J. 28. BOHLIN A. N. 176. EVERETT M. N. 56. SEE Evolution of Stellar Systems 1. DOBERCK A. N. 147, 179 u. a. LEWIS und TURNER M. N. 67 u. a. GUTHNICK und PRAGER, Festschrift Elster und Geitel. — 97. LUDENDORFF A. N. 193. PLUMMER M. N. 73 ff. SHAPLEY Ap. J. 40. EDDINGTON M. N. 79. Vgl. auch HAGEN A. N. 209. BOTTLINGER A. N. 210. — 98. CAMPBELL Li. B. 181. LUDENDORFF V. J. S. 45 ff. und A. N. HELLERICH Diss. Berlin, Bonn 1913. Ait. EDDINGTON M. N. 79. — 99. Polaris: Unters. von CAMPBELL, HARTMANN, HERTZSPRUNG, COURVOISIER. Algol: CHANDLER, BELOPOLSKY, CURTISS, SCHLESINGER, HELLERICH. λ Tauri: v. ARETIN, SCHLESINGER. ζ Cancri, ϵ Hydrae: SEELIGER. ξ Ursae maj.: NÖRLUND, HERTZSPRUNG. κ Pegasi: HENROTEAU M. N. 78. Li. B. 9, vgl. Ap. J. 12. 70 Ophiuchi: PAVEL Diss. Berlin 1920. ι Cassiopeiae: M. R. A. S. 56. — 100. MAURY H. A. 28. CANNON H. C. 221. Spektra von visuellen Doppelsternen CANNON H. A. 56. — 101. Hauptsächliche Quellen:

Hartwig V. J. S.; H. A.; H. C.; Harv. Bull.; A. N.; Ap. J.; Li. B.; M. N.; P. P.; V. B. B.; Pr. N. A.; Gesch. der Veränd. Sterne (Astr. Gesellsch.). — 102. Nach Butler M. N. 79. — 103. Lunt M. N. 79, 80. — 104. Newall M. N. 79. — 105. Evershed M. N. 79. — 106. Stratton M. N. 80. — 107. Cortie M. N. 79. — 108. Nicholson M. N. 72 ff. — 109. Spektrum der Nova P Cygni H. A. 28, 50, 56. Frost Ap. J. 35. — 110. Z. I. 25. — 111. Hartmann A. N. 177. Adams und Pease Ap. J. 40. — 112. Nebel um Nova Persei: Wolf, Perrine, Ritchey, Bohlin, Kopff. A. N. 156. P. H. 2. Ap. J. 14—17. — 113. Kapteyn, A. N. 157. Seeliger Ap. J. 16, 20. Bell Ap. J. 16. Kopff P. H. 2. Newcomb A. J. 549. — 114. Perrine Ap. J. 16, 17. — 115. Wilsing A. N. 208. Guthnick A. N. 210. — 116. Ludendorff P. P. 19; A. N. 209. Spektrum H. A., P. P., Yerkes. — 117. Ludendorff A. N. 209. Maggini Ap. J. 48. Guthnick A. N. 209. — 118. Spektrum H. A. 56. Nijlands Hypothese in Hemel en Dampkring 1917, vgl. auch v. d. Bilts Untersuchungen über U Geminorum (Publ. Utrecht). Ferner Leiner A. N. 211. — 119. Hagen M. N. 79. — 120. Schwarzschild Publ. Wien-Ottakring 5. Wirtz A. N. 154. Wilkens A. N. 172. Shapley Ap. J. 44. XX Cygni: H. und M. B. Shapley Ap. J. 42. δ Cephei, ζ Geminorum: Guthnick A. N. 208, 211. RR Lyrae: Martin und Plummer M. N. 75. Prager Sitz.-Ber. Berlin 1916. Shapley Ap. J. 43. Beziehung zwischen Lichtkurve und Geschwindigkeitskurve der δ Cephei-Sterne: S. Albrecht Li. B. 118, Ap. J. 25. — 121. Russell Ap. J. 35, 36. Shapley Ap. J. 38. β Lyrae: Stebbins Li. B. 277. Guthnick und Prager Sitz.-Ber. Berlin 1917. Baade Diss. Göttingen 1918. Algol: Stebbins Ap. J. 32, 33. Wilsing A. N. 124. β Aurigae: Stebbins Ap. J. 34. u Herculis: P. A. O. 2. — 122. V. B. B. 1, 2; A. N. 208, 211. — 123. Shapley C. M. W. 16 Artikel. — 124. Wright Ap. J. 40. Keeler P. L. 3. Campbell A. A. 13. Pickering P. A. S. P. 2 u. a. — 125. Wright Pr. N. A. 1. — 126. Leavitt H. C. 172. — 127. Untersuchungen über kugelf. Sternhaufen von Scheiner, Ludendorff, Pickering, v. Zeipel, Fagerholm, Küstner und seinen Schülern u. a. — 128. Pease und Adams, Spektren von 40 Sternen in M 13 A—K, im Durchschnitt F. — 129. Fath Li. B. 149; Ap. J. 33, 36, 37. Lundmark und Lindblad A. N. 205; Ap. J. 46. Hertzsprung Ap. J. 41 u. a. — 130. Vermessungen von kugelf. Sternhaufen von Scheiner, Ludendorff, Gould, Bonn, Heidelberg, Fagerholm, Bohlin, Plummer u. a. — 131. Slipher P. A. 26 und bei Shapley Artikel 12; J. C. R. A. S. 11. — 132. H. A. 60 u. a., Shapleys Artikel u. a. — 133. Seares und Shapley Pr. N. A. 1 und Ap. J. 42. Shapleys Artikel. Hertzsprung Ap. J. 42. — 134. Lau, Rosenberg, Hertzsprung u. a. P. P. und A. N. — 135. O 41; P. L. 8. — 136. O. 39; N. E.; Shapleys Artikel. Hardcastle und Hinks M. N. 74. Sanford Li. B. 297. Sullivan O. 39 (133). Truman P. A. 1916; O. 39 (134). — 137. Reynolds O. 39. — 138. v. d. Pahlen A. N. 188. L. Becker M. N. 77. — 139. Spektrum der Spiralnebel: Zahlreiche Untersuchungen von Wolf, Fath, Slipher, Pease u. a. H. S.; C. M. W.; Ap. J. 33, 37; Li. B. 149 u. a. — 140. Seares Pr. N. A. 2. Lundmark und Lindblad A. N. 205, Ap. J. 46. — 141. Zahlreiche Untersuchungen von Wolf (V. J. S. 49), Slipher, Pease, Wright, Adams. Rotation der Spiralnebel: Wolf, Slipher, Pease, Adams. Innere Bewegungen (sphärische) van Maanen Pr. N. A. 2. Kostinsky M. N. 77. — 142. Curtis P. A. S. P. 27. — 143. Shapley, Curtis O. 41. Lundmark A. N. 209. — 144. Hartmann V. J. S. 52. Wolf A. N. 204. — 145a. W. H. Pickering S. M. 9. Wolf H. S. 1910. Barnard. — 145b. Buisson, Fabry und Bourget Ap. J. 40; O. 36, 38. Vgl. Michelson Ap. J. 2. Frost Pr. N. A. 1. Campbell P. A. S. P. 29. Wright Li. B. 19, 183. Ältere Untersuchungen der Radialgeschw. Vogel, Eberhard, Hartmann. — 146. Slipher Lo. B. 55; P. A. 21. Pease C. M. W. 132. P. A. S. P. 27. Hertzsprung A. N. 195. — 147. Barnard Pr. N. A. 1. Wolf vgl. Anm. 1. Spektrum: Wolf A. N. 204. Slipher Lo. B. 75. Vgl. P. A. 23 (596); Ap. J. 41 (253), 43 (1). — 148. Barnard Ap. J. 31 u. a. Wolf H. S. u. a. — 149. Campbell und Moore Pr. N. A. 1. Sanford R. M. W. 1919. Nebel in den Magellanschen Wolken: Wilson Pr. N. A. 1. Vgl. auch Hertzsprung M. N. 80. — 150. Campbell und Moore Li. B. 278; Pr. N. A. 2; P. A. S. P. 28, 29; O. 40. Green Li. B. Bd. 9. — 151. Curtis P. A. S. P. 28. Curtis, Campbell und Moore O. 40. Größter Ringnebel (NGC 7293) P. A. S. P. 24, 28. Parallaxen: van Maanen Pr. N. A. 4; P. A. S. P. 30. Adams und Strömberg C. M. W. 131; Ap. J. 45. — 152. Keeler P. A. S. P. 2; P. L. 3. Campbell A. A. 13. Wright Ap. J. 40; Pr. N. A. 1.

LUDENDORFF A. N. 212. — 153. WOLF H. S. 1911ff.; A. N. 199. WRIGHT Pr. N. A. 1. CAMPBELL und MOORE P. A. S. P. 29. REYNOLDS M. N. 79. — 154. HIND A. N. 35. REYNOLDS M. N. 76. KNOX SHAW M. N. 76. LUDENDORFF A. N. 209. HUBBLE Ap. J. 44, 45; Pr. N. A. 2. SLIPHER P. A. 25. LAMPHAND P. A. 25. PEASE Ap. J. 45. R. M. W. 1919. BARNARD M. N. 35, 59. — 155. EDDINGTON M. N. 77. KOHLSCHÜTTER Natw. 7. SCHWARZSCHILD Göttinger Nachr. 1906. EMDEN Gaskugeln. RITTER W. A. 5—36. G. H. DARWIN Ph. T. 180. LANE, LORD KELVIN u. a. — 156. GYLDÉN Acta Soc. Fennicae 1880. BRUNS Monatsber. Berl. Ak. 1881. RUSSELL Ap. J. 24; P. A. 22. SEELIGER V. J. S. 43. HAGEN A. N. 209; Ap. J. 51. HELLERICH Diss. Berlin, Bonn 1913. LUDENDORFF A. N. 193. PLUMMER M. N. 73, 74, 75, 80. PERRINE Ap. J. 50. SHAPLEY Ap. J. 40. EDDINGTON M. N. 79. JEANS O. 42. ADAMS und SHAPLEY O. 42. BOTTLINGER A. N. 210. GUTHNICK und PRAGER V. B. B. 1, 2. GUTHNICK A. N. 208, 209. BOSS 46 A. N. 211. Ältere Theorien von LOUD (CURTISS) und DUNCAN Ap. J. und Li. B. — 157. SEELIGER A. N. 130, 133. HALM A. N. 156, 160. KIENLE Ph. Z. 21. ZÖLLNERS Photometr. Untersuchungen. NEWCOMB A. J. 550. WILSING u. a. — 158. KONEN Die Wissenschaft 49. KAYSER, Handbuch der Spektroskopie. NICHOLSON M. N. 72ff. BOHR Phil. Mag. 1913; M. N. 74 (359).

DAS STERNSYSTEM.

Von

H. Kobold.

Ziel der messenden Astronomie.

I. Entwicklung der Kenntnis von den Entfernungen und Bewegungen der Fixsterne. Während die Astrophysik ihre Hauptaufgabe in der Erforschung der im vorigen Kapitel besprochenen physikalischen Verhältnisse der fernen Weltkörper erblickt, besteht das Ziel der älteren Astronomie, der Astrometrie, in der fortgesetzten Erweiterung unserer Kenntnisse über den Bau des Universums und die Bewegungen, die in ihm herrschen und seine Wandlungen bestimmen. Der exakten Forschung war bis in die jüngste Zeit der Weg zu diesem Ziele verschlossen, es fehlten Hilfsmittel, die den Schwierigkeiten der Aufgabe gewachsen gewesen wären. Aber der vollen Größe dieser Schwierigkeiten ward man sich doch erst bewußt im Laufe der zur Ergründung des Zusammenhanges der Erscheinungen am gestirnten Himmel ausgeführten Forschungen. Die Unveränderlichkeit der scheinbaren Stellung der Sterne, die man in der Bezeichnung Fixsterne zum Ausdruck brachte, rief die Überzeugung von der Ruhe der Erde wach. Bei endlicher Entfernung der Sterne muß jede Ortsänderung des Beobachters eine scheinbare Änderung des Ortes eines Gestirns hervorrufen. Bei den Körpern unseres Sonnensystems genügt schon die auf der Erdoberfläche mögliche Ortsänderung des Beobachters, um eine erkennbare Wirkung im scheinbaren Orte hervorzurufen. Daß aber die Entfernung der Fixsterne viel zu groß sei, um sie durch den Halbmesser der Erdkugel zu messen, lehrte schon Aristarch (150 v. Chr.). Eine der Wirklichkeit auch nur annähernd entsprechende Vorstellung von der wahren Entfernung der Fixsterne konnte man sich trotzdem nicht machen, und so schloß man aus der scheinbaren Ruhe der Sterne auf die Ruhe der Erde im Raume. Als dann die Lehre des Kopernikus der Erde die Unbeweglichkeit absprach und sie in einem ungeheuren Kreise, beständig sich um ihre Achse drehend, um die Sonne sich bewegen ließ, da bildete der Mangel eines Ausdrucks dieser Bewegung im Orte der Fixsterne den gefährlichsten Stein des Anstoßes und rief, als es allen Bemühungen der schon wesentlich verfeinerten Beobachtungskunst zum Trotz nicht gelang, den Nachweis solcher Bewegungen zu erbringen, den nur durch das Fehlen einer annähernd richtigen Vorstellung von der Entfernung der Sterne verständlichen Gedanken des Tychonischen Systems

Schwierigkeit der Entfernungsmessung bei den Fixsternen.

der die ruhende Erde umkreisenden und die Planeten mit sich führenden Sonne hervor. Doch die siegende Kraft der Wahrheit, die dem Gedanken des Kopernikanischen Systems innewohnte, überwand auch diese Schwierigkeiten. Wie man sich, bezwungen durch die logische Klarheit des Aufbaues des Systems und durch die Macht der Tatsachen, daran gewöhnt hatte, unsere Erde der bevorzugten Stellung zu entkleiden und zu einem Gliede von recht untergeordneter Bedeutung in dem großen Ganzen werden zu lassen, so drang auch bald die Überzeugung durch, daß die ungeheure Bahn, die die Erde im Laufe eines Jahres durchmißt, doch nur verschwindend klein sei gegenüber der Entfernung der Sterne, daß die die Bewegung der Erde abspiegelnde scheinbare Bewegung der Sterne zwar vorhanden, aber nur durch die allerfeinsten Messungen nachweisbar sei. So wurde dann für die folgenden Jahrhunderte das Streben, scheinbare Bewegungen der Fixsterne nachzuweisen, eine mächtige Triebfeder zur steten Vervollkommnung der Instrumente und der Beobachtungsmethoden, und auch heute noch wirkt die Schwierigkeit der Aufgabe, wenn es auch seit der Mitte des 19. Jahrhunderts möglich geworden ist, in günstigen Fällen sie zu besiegen, in der gleichen Richtung.

Entwicklung der Genauigkeit der Messung.

Als im Zeitalter des Kopernikus die heutige Astronomie ins Leben gerufen ward, war es Tycho Brahe, dem größten praktischen Astronomen seiner Zeit, höchstens möglich, in einer einzelnen Ortsbestimmung eines Sternes eine Genauigkeit von etwa 3′ zu erzielen, und es mußten ihm daher die im scheinbaren Orte der Sterne durch die Erdbewegung hervorgerufenen Änderungen verborgen bleiben, wenn die Entfernung der Fixsterne wenigstens das Tausendfache des Erdbahnradius betrug. Mit der Einführung des Fernrohres steigerte sich die Genauigkeit der Ortsbestimmungen sehr erheblich, und für Flamsteeds Beobachtungen (1676—1717) hatte die Bogensekunde schon reelle Bedeutung. Die eigentliche Entwicklung der neueren Beobachtungskunst beginnt mit dem Wirken Bradleys (1721—1762). Die von diesem unvergleichlichen Beobachter erreichte, erst im 19. Jahrhundert wieder übertroffene Genauigkeit der Beobachtungen reichte zur Lösung der Aufgabe aber auch noch nicht aus, sie vermochte vielmehr nur die Schwierigkeit der Aufgabe erneut in helles Licht zu setzen dadurch, daß es Bradley zwar im Jahre 1728 gelang, in seinen Beobachtungen des Sternes γ Draconis eine jährliche periodische Anderung nachzuweisen, die in der Tat gedeutet werden konnte als ein Bild der Erdbahn, die aber, wie Bradley selbst erkannte, nicht mit einer meßbaren Entfernung des Sternes in Zusammenhang gesetzt werden konnte, sondern sich als eine Folge der endlichen Geschwindigkeit des Lichtes herausstellte. Bradleys Entdeckung der „Aberration“ führte die beobachtende Astronomie um einen großen, für die Bestimmung der Fixsternentfernungen unerläßlichen Schritt weiter, aber die Wirkung dieser Entfernung ist im günstigsten Falle nur der 25. Teil der von Bradley enthüllten Bewegung, sie besteht nur in einer geringfügigen Änderung der Gestalt der Bahn, die der scheinbare Sternort infolge der Aberration beschreibt. Erst

durch eine weitere erhebliche Steigerung der Genauigkeit der Beobachtungen ist es in neuester Zeit möglich geworden, für besonders geeignete und verhältnismäßig nahe Sterne im scheinbaren Ort wirkliche aus der endlichen Entfernung hervorgehende Abweichungen nachzuweisen.

Fehlerursachen bei den Beobachtungen.

Der beobachtete scheinbare, auf bestimmte feste Richtungen im Raume bezogene Ort eines Gestirnes wird nicht allein durch die zufälligen Beobachtungsfehler entstellt; er wird beeinflußt durch die Fehler in der Annahme der zur Reduktion auf feste Richtungen im Raume nötigen Größen, und es gehen weiter in ihn ein die den augenblicklichen Zustand des Instrumentes und der umgebenden Luft bedingenden Verhältnisse. Die Fortschritte der Technik und die zunehmende Erfahrung führten zwar eine stetige Verkleinerung des reinen Beobachtungsfehlers herbei, sie ermöglichten auch eine vollkommenere Elimination der übrigen die Beobachtungen entstellenden Einflüsse, aber es war doch nicht möglich, diese störenden, zum Teil gar nicht zu umgehenden Einflüsse in demselben Maße herabzusetzen wie den zufälligen Beobachtungsfehler. Unter den Ursachen dieser Fehlerquellen nimmt nun die Wärme einen hervorragenden Platz ein, und es müssen deshalb diese Fehler für die Entfernungsbestimmungen aus einer scheinbaren Ortsänderung, die ebenso wie die Wärme an eine jährliche Periode gebunden ist, eine besonders verderbliche Rolle spielen.

Relative Messung.

Wirksame Hilfe brachte in dieser Beziehung erst ein schon von Galilei verfolgter Gedanke, der auf die Bestimmung der Differenz der Wirkung der Entfernung bei zwei am Himmel nahe beieinander stehenden Sternen hinausläuft. Aus dieser Differenz fallen ja alle vom Zustande des Instrumentes, von den Beobachtungsbedingungen und von der Kenntnis der Reduktionselemente abhängigen Fehler heraus, sie hängt im wesentlichen nur ab vom reinen Beobachtungsfehler, und die Sicherheit ihrer Bestimmung wächst demnach in direktem Verhältnisse mit der Vervollkommnung der Meßinstrumente. Angewandt auf zwei Sterne, deren einer in endlicher Entfernung steht und die Bewegung der Erde widerspiegelt, während der andere in so sehr viel größerer Entfernung sich befindet, daß eine Bewegung des Beobachters um eine dem Durchmesser der Erdbahn gleiche Entfernung eine meßbare Ortsänderung des Sternes nicht bewirkt, mußte diese Methode zum Ziele führen, sobald die Genauigkeit der mikrometrischen Messung eine genügende war. Dies war allerdings zu Galileis Zeit noch nicht der Fall. Als aber gegen Ende des 18. Jahrhunderts der Galileische Gedanke wieder aufgenommen wurde, erwies er sich bald als fruchtbar. Galilei fand mit dem neuen Hilfsmittel, dem Fernrohr, daß viele der hellen Sterne schwache Begleiter hatten. Er dachte nun, daß diese so verschieden hellen Sterne vermutlich in sehr verschiedener Entfernung stehen würden und deshalb eine relative Bewegung infolge der Bewegung der Erde zeigen müßten. Die späteren Beobachtungen deckten in der Tat solche relativen Bewegungen bei vielen dieser Sternpaare auf, diese Bewegungen hatten aber nicht die charakteristischen Eigenschaften, die sie als Spiegelbild der Erdbewegung

kennzeichneten, sie waren vielmehr eine Folge einer physischen Verbindung zwischen den beiden Komponenten des Sternpaares. Diese zweite wichtige Entdeckung, die das Streben, die Aufgabe zu lösen, zeitigte, erbrachte den vollgültigen Beweis, daß der eingeschlagene Weg zur Aufdeckung geringer relativer Bewegungen durchaus geeignet sei und daß es nur notwendig sei, zwei Sterne miteinander zu vergleichen, die nicht physisch verbunden sind. Die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines physischen Zusammenhanges nimmt nun aber sehr schnell ab mit wachsendem gegenseitigem Abstand der Sterne. Wählt man also für den auf Entfernung zu untersuchenden Stern als Vergleichsstern einen oder, um die Sicherheit des Resultates noch mehr zu erhöhen, mehrere schwache Sterne in etwas größerem, aber immer noch mikrometrisch mit ausreichender Sicherheit meßbarem Abstande, so wird sich die verschiedene Entfernung in Änderungen dieser Abstände verraten, die einer jährlichen Periode unterworfen sind. Dieses ist der Weg, der zur Bestimmung der Entfernung der Fixsterne seit Anfang des 19. Jahrhunderts eingeschlagen wird und auf dem wir zu unserer jetzigen Kenntnis über die räumliche Ausdehnung der Fixsternwelt gelangt sind.

Eigenbewegung der Fixsterne.

Im Lichte dieser den tatsächlichen Verhältnissen entsprechenden Vorstellung von der Entfernung der Sterne gewinnt nun die Bezeichnung derselben als Fixsterne einen ganz wesentlich geänderten Inhalt. Eine der Größe nach der Bewegung der Erde in ihrer Bahn gleiche fortschreitende Ortsänderung eines Sternes im Raume würde sich für uns im günstigsten Falle, wenn sie senkrecht zur Visierrichtung erfolgt, im scheinbaren Orte des Sternes ebenso zu erkennen geben wie die jährliche Bewegung der Erde, d. h. sie wäre nur auf mikrometrischem Wege mit den allerfeinsten Hilfsmitteln nachweisbar. Sollte sie dem freien Auge erkennbar werden, so müssen wir die Zeitdifferenz der miteinander verglichenen Positionen des Sternes entsprechend vergrößern. Dies ward durch die Beobachtung bald bestätigt. Halley fand 1718, daß die von ihm beobachteten Sternpositionen von den etwa 2000 Jahre zurückliegenden, von Hipparch beobachteten und von Ptolemäus uns überlieferten nach Berücksichtigung der gesetzmäßigen Änderungen der Fundamentalebenen in vielen Fällen sich um Beträge unterschieden, die auch dem freien Auge nicht entgehen konnten. Die größten Ortsänderungen fand er bei Arcturus (α Bootis), dessen Ortsänderung in 2000 Jahren $1^1/_4$ Grad, also $2^1/_2$ Monddurchmesser, beträgt. Sirius und Procyon änderten in derselben Zeit ihren Ort um etwa $1^1/_2$ Monddurchmesser. Halley konnte seine Untersuchungen nur auf die hellen Sterne ausdehnen und wegen der Unsicherheit der Grundlagen nur ungewöhnlich große Bewegungen nachweisen. In den seitdem verflossenen zwei Jahrhunderten ist es aber gelungen, unsere Kenntnis dieser Ortsänderungen der Sterne, die wir Eigenbewegung nennen, außerordentlich zu vervollständigen, da die größere Genauigkeit der Beobachtungen die Kürze der Zwischenzeit ausglich. Wir kennen jetzt die Eigenbewegung für mehrere tausend Sterne. Die Beobachtungen ergeben uns diese Bewegungen ausgedrückt in Bogen-

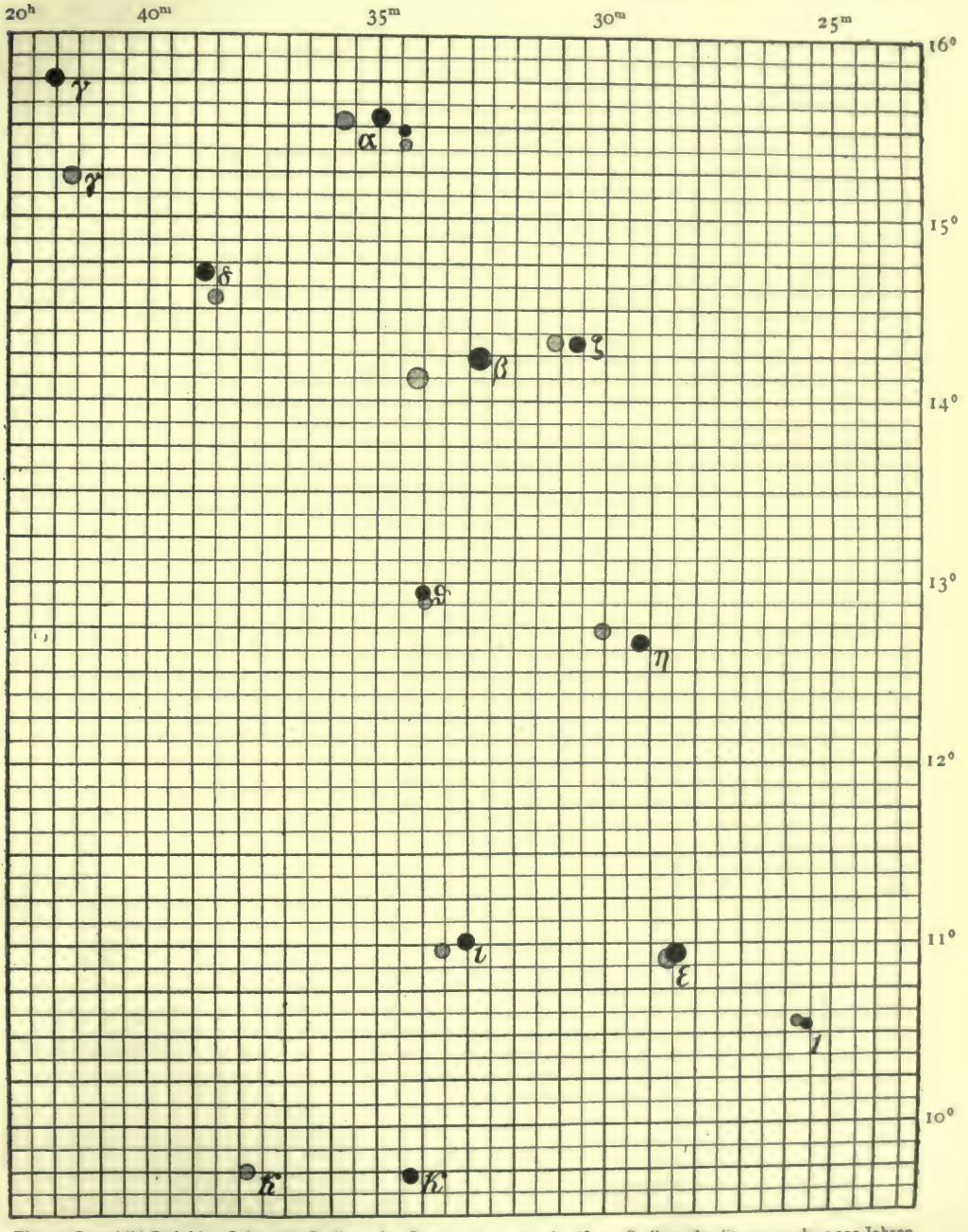


Fig. 35. Sternbild Delphin. Schwarz: Stellung der Sterne um 1500, schraffiert: Stellung der Sterne nach 10000 Jahren.

maß, da es ja Richtungsänderungen sind. Für Sterne bekannter Entfernung kennen wir aber dann auch den linearen Betrag dieser Bewegung, soweit sie senkrecht zur Visierrichtung erfolgt. Die Spektralanalyse hat gegen Ende des vorigen Jahrhunderts eine wichtige Ergänzung dieser Kenntnis dadurch bewirkt, daß sie uns lehrte, auch die Bewegungen der Himmelskörper in der Richtung der Verbindungslinie unseres Auges mit denselben, des Visions-

radius, zu messen. Diese zweite Komponente der Bewegung im Raume, die Radialbewegung, kennen wir zur Zeit für etwa 2000 Sterne, und unsere Kenntnis erweitert sich in dieser Richtung in schneller Folge. Für diejenigen Sterne, für die wir sowohl die Entfernung als auch die beiden Komponenten der Bewegung kennen, können wir schließlich die wirkliche totale Bewegung im Raume berechnen.

Radialbewegungen.

Im Verlauf hinreichend langer Zeiträume müssen die seitlichen Bewegungen den Anblick des gestirnten Himmels merklich verändern. Fig. 35 stellt das Sternbild des Delphins dar, wie es uns jetzt erscheint, und in anderer Darstellung dasselbe Sternbild, wie es sich nach 10000 Jahren den Blicken der Erdenbewohner darbieten wird, und die Vergleichung bringt die Wirkung der Eigenbewegung in diesem Falle deutlich zur Anschauung. Während es für das freie Auge eines Zeitraums von Tausenden von Jahren bedarf, um die Wirkung der Eigenbewegungen merklich zu machen, gestattet die photographische Platte eine Einengung des Zwischenraumes auf wenige Jahre. Um bei einer Vergleichung zweier Aufnahmen derselben Himmelsgegend die bewegten Sterne zu erkennen, bedient man sich am besten des Stereokomparators. Man berichtigt die Lage der beiden Platten so, daß die Bilder der schwachen Sterne des Hintergrundes sich decken, dann fallen die bewegten Sterne sofort dadurch ins Auge, daß sie scheinbar in einer anderen Ebene liegen als der allgemeine Hintergrund, und durch Ausmessung der beiden Platten erhält man dann die Bewegungen gegen die Sterne des Hintergrundes. Auf diesem Wege haben besonders Wolf in Heidelberg und Innes in Johannesburg in jüngster Zeit ein großes Material von Bewegungen gesammelt.

Eine der größten uns bekannten Eigenbewegungen kommt einem schwachen, im Sternbilde Pictor der südlichen Halbkugel stehenden und zu den uns nächsten gehörenden Sterne zu. Seine Entfernung beträgt 660000 Erdbahnhalbmesser, seine jährliche Eigenbewegung 8″.72 oder linear 27.9 Erdbahnhalbmesser, entsprechend einer Bewegung senkrecht zum Visionsradius von 132 km in der Sekunde. Für die Bewegung in der Richtung des Visionsradius fand Curtis den Wert + 242 km in der Sekunde, sodaß der Abstand des Sternes von der Sonne in einem Jahre um 51.2 Erdbahnradien wachsen würde. Vermöge dieser Bewegung wird der Stern nach Verlauf von 12900 Jahren eine doppelt so große Entfernung haben als jetzt, seine Helligkeit wird auf den vierten Teil gesunken sein.

II. Sternkataloge. Die Aufdeckung von Gesetzmäßigkeiten in diesen Änderungen des Ortes und der Entfernung der Fixsterne müßte eine wichtige Handhabe darbieten zur Erforschung des Sternsystems. Auf die Herbeischaffung dieser Grundlagen hat man — wenn auch aus anderen Gründen — schon in den frühesten Zeiten großes Gewicht gelegt und begonnen, Verzeichnisse der Örter der Sterne am Himmel, Sternkataloge, anzufertigen. Über die älteren Verzeichnisse dieser Art ist schon an einer früheren Stelle

Anlegung von Sternverzeichnissen.

(S. 147) gesprochen worden. Erst die Einführung des Fernrohres in die praktische Astronomie gab aber den Beobachtungen diejenige Genauigkeit, die sie für den hier verfolgten Zweck tauglich machte, und so kann denn der auf Flamsteeds im letzten Viertel des 17. Jahrhunderts in Greenwich erhaltenen Beobachtungen beruhende Katalog als der Ausgangspunkt der langen Reihe der Verzeichnisse betrachtet werden, in denen die moderne Astronomie die Grundlagen der genauen Kenntnis des Fixsternhimmels in stetiger Arbeit sammelt. Auf der Sternwarte zu Greenwich, der bei ihrer Gründung die genaue Beobachtung der Fixsternörter zur Sicherung der Schiffahrt als Hauptaufgabe gestellt war, wurden dann in der Mitte des 18. Jahrhunderts durch Bradley und seine Gehilfen auch die Beobachtungen angestellt, die durch Bessels sorgfältige Bearbeitung in den „Fundamenta Astronomiae" (1818) für die praktische Astronomie unserer Zeit von grundlegender Bedeutung geworden sind.

Die Aufgabe der Katalogisierung der Sterne trennt man in der Praxis in zwei Teile. Man bestimmt einerseits die Positionen einer größeren Anzahl möglichst gleichmäßig über den ganzen Himmel verteilter Sterne, der „Fundamentalsterne", so genau wie irgend möglich durch unabhängige Beobachtungen und benutzt dann für den zweiten Teil der Aufgabe diese Fundamentalsterne, um die große Masse der übrigen Sterne durch Anschließen an dieselben festzulegen. Die Bestimmung der Fixsternörter erfolgt jetzt ausschließlich im System der Rektaszension und Deklination, während früher, noch bis zu Tychos Zeit, das System der Länge und Breite in Gebrauch war. Fundamentalsterne.

Die Bestimmung der Rektaszension erfolgt durch die Beobachtung der Uhrzeit der Durchgänge der Gestirne durch den Meridian, die der Deklination durch Messung ihrer Zenitdistanzen im Augenblick der Kulmination. Die Rektaszension ist die Differenz der Kulminationszeiten des Gestirnes und des Frühlingspunktes, des Anfangspunktes der Zählung der Rektaszensionen.

Ist die Polhöhe des Beobachtungsortes bekannt (vgl. darüber das Kapitel Astronomische Ortsbestimmung), so erfordert die absolute Bestimmung der Deklination der Fundamentalsterne nur noch die Befreiung der beobachteten Meridianzenitdistanzen vom Einflusse der Strahlenbrechung in der Erdatmosphäre, der Refraktion, und vom Einflusse der dem Instrumente anhaftenden Fehler. Die physikalische Theorie der Refraktion ergibt sich aus den Brechungsgesetzen des Lichtes und aus auf Beobachtungen gestützten Annahmen über die Konstitution der Erdatmosphäre. Die Refraktion, die die Zenitdistanzen aller Gestirne zu klein erscheinen läßt, ist abhängig von der Zenitdistanz des Gestirnes und außerdem von der Temperatur, dem Druck und der Feuchtigkeit der das Instrument umgebenden Luft. Die Konstante des Hauptgliedes der Refraktion, die sogenannte Refraktionskonstante, ist aus den beobachteten Zenitdistanzen selbst durch Kombination der bei oberer und der bei unterer Kulmination beobachteten Werte zu bestimmen. Die erste unter Zugrundelegung einer ausreichenden Theorie ausgeführte Absolute Deklination. Refraktion.

Bestimmung dieser Konstante verdanken wir Bessel. Die Feststellung ihres wahren Wertes wird wesentlich erschwert durch die Schwierigkeiten, die sich der Ermittlung der wahren Temperatur der Luft in der Umgebung des Instrumentes entgegenstellen, und die neueren Versuche, zu einem der Wahrheit noch näher kommenden Werte der Konstanten zu gelangen, zielen vor allem darauf hinaus, diese Fehlerquelle unschädlich zu machen. Die den mittleren Werten von Temperatur und Luftdruck entsprechende Refraktion, die „mittlere Refraktion", hat folgende Beträge:

Zenitdistanz	Refraktion
90°	34′ 54″
85°	9 46
80°	5 16.2
70°	2 37.3
45°	0 57.7
0°	0.0.

Schwierigkeiten für die Bestimmung der Konstante der Refraktion ergeben sich auch aus der durch die Dispersion der Luft hervorgerufenen Abhängigkeit des Brechungsexponenten der Luft, und damit der Refraktion, von der Wellenlänge der Lichtstrahlen. Die Farbe der Sterne und die Extinktion der Atmosphäre auf die in großer Zenitdistanz in ein Spektrum ausgezogenen Bilder der Sterne sind für die Refraktion von erheblichem, noch nicht hinreichend festgestelltem Einflusse. Anomale Verhältnisse in der Schichtung der Luft rufen auch anomale Refraktionen hervor, die sich der Berechnung entziehen. Die Temperaturdifferenz der äußeren Luft und der Luft im Beobachtungssaale sowie die durch die äußere Form des Beobachtungssaales, durch Ausstrahlung der Wände oder anderer Wärmequellen hervorgerufene unregelmäßige Schichtung der Luft im Beobachtungssaale geben am leichtesten Anlaß zu Refraktionsstörungen, und ihre Vermeidung oder möglichste Einschränkung ist ein wesentliches Erfordernis für die Erzielung guter Beobachtungen der Zenitdistanzen.

Von den dem Instrumente anhaftenden Fehlern, der Biegung, den Teilfehlern des Kreises, wird im vorletzten Abschnitt gesprochen werden.

Absolute Rektaszensionen. Die Bestimmung absoluter Rektaszensionen erfordert die Kombination von Meridiandurchgangszeiten der Sterne und der Sonne. Für jeden Punkt der Ekliptik ergibt sich aus dem rechtwinkligen sphärischen Dreiecke, das durch seinen Deklinationskreis und durch die größten Kreise der Ekliptik und des Äquators gebildet wird, zu seiner Deklination unmittelbar seine Rektaszension, sobald wir den Winkel zwischen Ekliptik und Äquator, die Schiefe der Ekliptik, als bekannt voraussetzen. Die Schiefe wird ebenfalls am Meridiankreise bestimmt aus Beobachtungen der in der Ekliptik sich bewegenden Sonne zur Zeit der Solstitien, d. h. in der größten nördlichen und südlichen Deklination. Beobachten wir also beim Meridiandurchgange der Sonne ihre Deklination in derselben Weise wie die der Sterne, so finden wir durch Rechnung unter Berücksichtigung der 1″ nicht übersteigenden, gleichfalls bekannten Breite der Sonne direkt ihre Rektaszension. Die Be-

stimmung wird um so sicherer, je schneller die Deklination der Sonne sich ändert. Wir werden solche Beobachtungen also mit Vorteil nur ausführen, wenn die Sonne in der Nähe der Äquinoktialpunkte steht, d. h. um den 21. März und 22. September. Zu diesen Zeiten angestellte Deklinationsbeobachtungen der Sonne geben in Verbindung mit den gleichzeitigen Differenzen der Durchgangszeiten, d. h. der Rektaszensionen, der Sonne und eines Sternes die Rektaszension dieses Sternes. Der Fehler in der ermittelten Rektaszension des Sternes setzt sich zusammen aus dem Fehler der beobachteten Deklination der Sonne und demjenigen der Differenz der Durchgangszeiten, und da diese letztere mit Hilfe der Uhr bestimmt wird, so ist in erster Linie eine gute und vor allem eine von einer täglichen Periode im Uhrgange freie Uhr notwendig, und man wird sich zweckmäßig auf nicht zu weit von der Sonne entfernte helle Sterne beschränken, die auch bei Tage beobachtet werden können. Bessel wandte bei der Bearbeitung der Bradleyschen Beobachtungen dieses Verfahren der Bestimmung absoluter Rektaszensionen auf 14 Sterne an. Maskelyne, Bradleys Nachfolger in Greenwich, benutzte ein System von 36 Fundamentalsternen, das bis über die Mitte des 19. Jahrhunderts hinaus allgemein angewandt wurde.

Fundamentalsysteme.

Allmählich gewann aber eine andere, auf einer Zerlegung in zwei Teile beruhende Behandlung der Aufgabe die Oberhand. Man gleicht zunächst das System der Fundamentalsterne in sich aus durch Beobachtung der Rektaszensionsdifferenzen der Sterne und bestimmt dann durch Sonnenbeobachtungen die noch erforderliche Korrektion des Nullpunktes des Systems. Dabei kann der erste Teil der Aufgabe, der an die Ausrüstung geringere Forderungen stellt, an einer größeren Zahl von Sternwarten durchgeführt werden, während der zweite Teil, der besondere Vorrichtungen für die Sonnenbeobachtungen und besonders solche zur Kontrolle der Änderungen des Instrumentes erfordert, den entsprechend ausgerüsteten Sternwarten überlassen wird. Die weitere rechnerische Bearbeitung der so gewonnenen Koordinaten der Fundamentalsterne, die in der Zusammenfassung, der Untersuchung auf systematische Unterschiede und der Ausgleichung besteht, führt dann zu einem sogenannten Fundamentalsystem, wie sie durch Auwers, Newcomb und Boss aufgestellt worden sind. Von diesen Systemen umfaßt das Auwerssche 925, das Bosssche 1059 Sterne, während das Newcombsche eine wesentlich größere Zahl, 1596, mitnimmt, unter denen aber sehr viele sind, deren Örter zur Zeit noch nicht so weit gesichert sind, daß sie als Fundamentalsterne benutzt werden könnten. Die Hauptmasse der Sterne ist in allen drei Fundamentalkatalogen identisch.

Für die Ortsbestimmung und Katalogisierung der großen Menge der übrigen Sterne, soweit dieselben in den in ihren Dimensionen an ziemlich enge Grenzen gebundenen Meridianinstrumenten noch sicher beobachtbar sind, gelten nun diese Fundamentalsterne als Fixpunkte, deren Koordinaten innerhalb der Grenzen der ihnen innewohnenden Genauigkeit und der Beobachtungsfehler dargestellt werden müssen und so zur Kenntnis der Koordi-

naten der mit ihnen verglichenen Sterne führen. Von der Mitte des 18. bis zum Ende des 19. Jahrhunderts liegen etwa 350 solcher Sternkataloge vor. Die Akademie der Wissenschaften in Berlin hat es unternommen, alle diese Kataloge zu sichten, zu vergleichen und zu einem sie alle umfassenden Kataloge, der „Geschichte des Fixsternhimmels", zu verarbeiten, der mehr als 1 Million sich auf mehr als 250 000 Objekte verteilende Positionen enthalten wird.

Präzession und Nutation.

Die Beobachtungen bestimmen unmittelbar den Ort der Gestirne in bezug auf die augenblickliche Lage des Äquators und der Ekliptik. Beide Ebenen sind langsamen Bewegungen unterworfen, durch die sich die Lage der Achsen des Koordinatensystems ändert. Diese Bewegungen der Präzession der Nachtgleichen und der Nutation der Erdachse sind schon an einer früheren Stelle (S. 109) eingehend besprochen worden. Man würde sie theoretisch vollständig berechnen können, wenn man die Kenntnis der Massenverteilung im Erdinnern voraussetzen dürfte, muß aber, da jene Voraussetzung nicht erfüllt ist, das Hauptglied aus den Beobachtungen selbst bestimmen. Hieraus folgt, daß grundlegende Untersuchungen über die Eigenbewegungen der Fixsterne stets unzertrennlich mit einer Bestimmung der Präzession verbunden sind. Die um 1900 durch die Präzession bewirkte jährliche rückläufige Bewegung des Frühlingspunktes in der Ekliptik beträgt etwa 50″2, und die Schiefe der Ekliptik nimmt im Jahrhundert um etwa 47″ ab. Die Nutation bewirkt eine Bewegung des Poles in einer Ellipse mit den Achsen 9″4 und 6″9 sowie andere kleinere Schwankungen.

Zu diesen durch die Gestalt des Erdkörpers bedingten Bewegungen der Rotationsachse kommt schließlich noch die Seite 170 besprochene Polhöhenschwankung hinzu.

Durch Berechnung der aus diesen Bewegungen hervorgehenden Änderung der Lage der Koordinatenachsen gegen die für den Anfang des betreffenden Jahres geltende Lage, wozu die astronomischen Jahrbücher die erforderlichen Hilfsmittel geben, und durch Berücksichtigung dieses Unterschiedes werden die beobachteten Örter der Sterne reduziert auf die für den Jahresanfang geltende Lage der Fundamentalebene und des Frühlingspunktes.

Neben den Änderungen der Lage der Fundamentalebene ist nun weiter noch die Bewegung des Koordinatenanfanges, der für jede einzelne Beobachtung im Auge des Beobachters anzunehmen ist, in Rechnung zu stellen. Dem Koordinatenanfangspunkte wohnen drei Bewegungen inne: die Rotation der Erde, die Bahnbewegung der Erde und die fortschreitende Bewegung des ganzen Sonnensystems. Der Winkel zwischen der aus dem Mittelpunkte der Bewegung gesehenen Richtung nach dem Gestirn und der

Parallaxe.

scheinbaren Richtung heißt die Parallaxe (S. 202—208), und die drei Bewegungen rufen der Reihe nach die tägliche, die jährliche und die säkulare Parallaxe hervor, von denen für den scheinbaren Ort der Fixsterne nur die jährliche Parallaxe in Frage kommt, während die tägliche verschwindend klein ist und die säkulare eine konstante Änderung des Stern-

ortes erzeugt. Die jährliche Parallaxe spielt für die Entfernungsbestimmung der Sterne, die säkulare für die Bestimmung der Bewegung des Sonnensystems eine wesentliche Rolle; beide müssen in Verbindung mit diesen Problemen eingehender behandelt werden.

Außer der in der Parallaxe zum Ausdruck kommenden geometrischen Wirkung hat die Bewegung des Koordinatenanfangspunktes noch eine dynamische Wirkung. Wegen der endlichen Geschwindigkeit des Lichtes erscheint jedes Gestirn statt in der Richtung der das Auge mit ihm verbindenden Geraden in der Richtung der Diagonale eines Parallelogramms, das aus dem Wege, den das von dem Gestirne ausgehende Licht in der Zeiteinheit durchläuft, und dem Wege des Auges konstruiert wird. Das Gestirn erscheint dadurch in der Richtung der Bewegung des Beobachters um einen Winkel verschoben, der seinen Maximalwert annimmt, wenn die beiden Bewegungen in zueinander senkrechten Richtungen erfolgen. Diese Erscheinung wird als Aberration bezeichnet, und die drei oben genannten Bewegungen des Beobachters erzeugen eine tägliche, eine jährliche und eine säkulare Aberration, von denen die beiden ersten sich mit der Bewegung des Beobachters periodisch ändern, während die dritte konstant ist. Der Maximalbetrag der täglichen Aberration ist 0″.3, der der jährlichen 20″.5. Die jährliche Aberration würde einen im Pole der Ekliptik stehenden Stern stets um 20″.5 in der Richtung der Bewegung der Erde verschieben, der Stern würde nahezu einen Kreis mit 20″.5 als Halbmesser um seinen mittleren Ort beschreiben; dies war die von Bradley im Jahre 1728 entdeckte Erscheinung. Für alle übrigen Sterne geht der Aberrationskreis in eine Ellipse, für Sterne in der Ekliptik in eine gerade Linie über. Aberration.

Die Astronomischen Jahrbücher geben für jeden Tag des Jahres Hilfsgrößen an, mit denen man die dem Orte des Sternes entsprechenden Beträge der Präzession seit Anfang des Jahres, der Nutation und der Aberration berechnet. Durch Subtraktion dieser Beträge von den beobachteten scheinbaren Koordinaten der Sterne erhält man die gesuchten auf ein ruhendes System bezogenen mittleren Sternörter. Sollen die in einem längeren Zeitraum bestimmten Sternörter zu einem Kataloge vereinigt werden, so sind sämtliche Sternörter noch auf einen einzigen Jahresanfang zu übertragen durch Anbringung der Wirkung der Präzession.

III. Bestimmung der Fixsternentfernungen. Als Maß der Entfernung der Fixsterne dient die jährliche Parallaxe, der Winkel, unter welchem, vom Sterne aus gesehen, der Radius der Erdbahn, senkrecht gesehen, erscheint. Aus der Größe der Parallaxe folgt in dem rechtwinkligen Dreieck Sonne—Stern—Erde die Entfernung Sonne—Stern aus der bekannten Entfernung Sonne—Erde. Die Parallaxe, also die meßbare Entfernung eines Sterns, äußert sich darin, daß sein scheinbarer Ort an der Sphäre wegen der Bewegung der Erde um die Sonne im Laufe eines Jahres eine Ellipse durchläuft. Die Dimensionen der Ellipse hängen nur ab von der Entfernung des Parallaxenbestimmung.

Sternes, ihre Gestalt nur von der Stellung des Sternes in bezug auf die Ekliptik. Die Richtung der großen Achse der Ellipse fällt in den zu dem Sterne gehörenden Parallelkreis zur Ekliptik. Die kleine Achse verschwindet für Sterne in der Ekliptik, sie wächst mit dem Abstande der Sterne von der Ekliptik und wird am Pole der Ekliptik der großen Achse gleich.

Absolute Messungen.

Die Versuche, diese periodischen Änderungen der Koordinaten bei bestimmten Sternen durch die absoluten Ortsbestimmungen nachzuweisen und aus ihnen die „absolute" Parallaxe des betreffenden Sternes zu bestimmen, haben nur in wenigen Fällen zu verbürgten Werten geführt. Sie gelangen bei den uns besonders nahen Sternen α Centauri und Sirius, ferner beim Polarstern und anderen Sternen in der Nähe der Pole des Äquators, die einerseits durch die Größe der parallaktischen Ellipse, andererseits durch ihre langsame scheinbare Bewegung, die die Möglichkeit häufiger Einstellungen während des Durchganges durch das Gesichtsfeld des Fernrohres bietet, besonders geeignet sind. In der Anwendung auf nicht durch besonders günstige Stellung ausgezeichnete Sterne haben die in Pulkowa ausgeführten Beobachtungen der Fundamentalsterne zu Werten der Parallaxe mehrerer dieser Sterne geführt, die, wenn auch ihrem Betrage nach im einzelnen nicht hinreichend gesichert, doch wegen ihres Charakters als absolute Parallaxen einen beachtenswerten Beitrag bilden.

Die Reichweite dieser absoluten Methoden ist bislang sehr beschränkt geblieben, und die Aussicht, sie erweitert zu sehen, ist sehr gering. Unsere Kenntnisse der Fixsternentfernungen beruhen fast ausschließlich auf den Bestimmungen relativer Entfernungen durch Vergleichung benachbarter Sterne, deren parallaktische Ellipsen zwar gleich orientiert und von gleicher Gestalt sind, in den Dimensionen aber im umgekehrten Verhältnis der Entfernungen der Sterne stehen. Die Vergleichung der beiden Sterne führt wegen der gleichen Lage der großen Achse der beiden Ellipsen zur Kenntnis des Größenunterschiedes dieser Achsen, also zur Kenntnis des Unterschiedes der Parallaxen. Die Vergleichung der beiden Sterne erfolgt durch mikrometrische Messung, sie wurde erst möglich im zweiten Viertel des vorigen Jahrhunderts besonders durch die auf Fraunhofers Wirken zurückzuführenden Vervollkommnungen der mechanischen und optischen Hilfsmittel.

Relative Bestimmung.

Durch Vergleichungen des Doppelsterns 61 Cygni mit zwei schwachen Nachbarsternen mit Hilfe des Fraunhoferschen Heliometers führte Bessel im Jahre 1837 in Königsberg die erste von Erfolg gekrönte Parallaxenbestimmung aus. Der von Bessel erhaltene Wert 0″.34 ist durch vielfache spätere Prüfungen sehr nahe bestätigt worden, und das zu dieser ersten erfolgreichen Beobachtung benutzte Instrument hat sich auch weiterhin als das vollkommenste Hilfsmittel für die vorliegende Aufgabe erwiesen. Das Messungsprinzip besteht beim Heliometer darin, daß man das Objektiv des Fernrohres in zwei, in der Richtung der Schnittlinie verschiebbare Hälften zerschneidet, sodaß es von jedem Sterne zwei Bilder erzeugt. Stehen die

Heliometer.

beiden Objektivhälften einander genau gegenüber, so koinzidieren die beiden Bilder; sie bewegen sich auseinander, wenn man die Hälften gegeneinander verschiebt. Bewirkt man ein Zusammenfallen des von der einen Objektivhälfte erzeugten Bildes des einen Sternes mit dem von der anderen Objektivhälfte erzeugten Bilde eines zweiten Sternes, so mißt die Entfernung der Hälften, die mit äußerster Genauigkeit bestimmbar gemacht ist, den Winkel zwischen den beiden Sternen. Man erzielt die größte Genauigkeit, wenn man den zu beobachtenden Stern mit zwei nahen schwachen Sternen vergleicht, die in entgegengesetzter Richtung stehen, sodaß die drei Sterne nahe eine gerade Linie, möglichst in der Richtung der großen Achse der parallaktischen Ellipse des Sternes, bilden. Die Bedingung, daß der Abstand der beiden schwachen Sterne, wenn ihre Entfernung wirklich unmeßbar groß ist, bei allen Messungen denselben Wert behalten muß, bildet dann eine sehr wirksame Kontrolle der Beobachtungen und führt die Abstandsmessungen im wesentlichen auf eine Interpolation zurück. Auf diesem Wege sind in neuerer Zeit mit den neueren und größeren Repsoldschen Heliometern am Kap der Guten Hoffnung, in Newhaven und in Leipzig eine Reihe von Parallaxenbestimmungen mit vollem Erfolge ausgeführt worden.

Weniger glücklich war man in dem Versuche, die mikrometrische Vergleichung im Gesichtsfelde gewöhnlicher Refraktoren, bei der man sich durch eine äußerst sorgfältig gearbeitete feine Schraube bewegter Fäden bedient, so weit zu vervollkommnen, daß sie eine der Lösung der Aufgabe gewachsene Genauigkeit erlangte. Der von äußeren, sich der sicheren Kontrolle entziehenden Umständen abhängige Zustand des Instrumentes und besonders die mit der Lage des Instrumentes sich ändernde Wirkung der Schwere auf die einzelnen Teile des Instrumentes bieten zur Zeit noch sehr gefährliche, leicht zu systematischen Entstellungen Anlaß gebende Fehlerquellen. Fadenmikrometer.

Auch die Hoffnung, von der photographischen Platte weitreichende Hilfe zu erlangen, schien lange illusorisch. Große, mit aller erdenklichen Sorgfalt durchgeführte Beobachtungsreihen konnten nachher vor der Kritik nicht bestehen, und ihre Resultate mußten als wertlos betrachtet werden. Gelang es auch in einzelnen Fällen der Schwierigkeiten scheinbar Herr zu werden und dem Resultate hinreichenden Anspruch auf Vertrauen zu verleihen, so war die Arbeit kaum weniger mühsam als die der direkten Messung. Unterschiede in der Farbe und in der Helligkeit spielen beim photographischen Prozeß eine größere Rolle als bei der direkten Beobachtung, und die Fehler in der Nachführung des Instrumentes während der Belichtung der Platte machen sich bei verschieden hellen Sternen in verschiedenem Maße geltend und erzeugen so systematische Fehler. Daß diese Schwierigkeiten aber zu überwinden sind, geht aus den in neuerer Zeit ausgeführten und als durchaus gelungen zu betrachtenden photographischen Parallaxenbestimmungen hervor. Besonders hervorzuheben sind die mit Photographie.

dem großen Yerkes-Refraktor, bei dem allerdings der große Skalenwert als besonders günstiges Moment ins Gewicht fällt, ausgeführten Reihen.

Bestimmung in Mengen.

Von großer Bedeutung ist die photographische Methode dadurch geworden, daß sie es uns ermöglicht, auf einfachem Wege größere Gebiete des Himmels auf Sterne mit merklicher Parallaxe zu untersuchen. Erzeugen wir auf ein und derselben Platte Bilder der gleichen Stelle des Himmels, die drei Zeiten der Maximalwirkung der Parallaxe, zweier in der einen und der dazwischenliegenden in der entgegengesetzten Richtung, entsprechen, so gibt uns die Ausmessung der Platte die Parallaxe der einzelnen Sterne bezogen auf die mittlere Parallaxe aller Sterne der Platte unter Elimination der der Zeit proportional fortschreitenden Änderungen der Platte. Diese von Kapteyn vorgeschlagene Methode, die in absehbarer Zeit eine Durchforschung des Himmels in bezug auf uns verhältnismäßig nahe, unserer Kenntnis aber noch verborgen gebliebene Sterne ermöglichen und uns außerdem über die mittleren Entfernungen der Sterne Aufschluß geben würde, ist durch mehrfache Versuche schon erprobt.

Bevor noch diese mikrometrischen Methoden zur Durchbildung gelangt waren und als noch ausschließlich die Meridianinstrumente zur Lösung der Aufgabe zur Verfügung standen, wurde schon versucht, relative Parallaxen durch Rektaszensionsdifferenzen zu bestimmen. Bei Sternen, deren Länge um 180^0 verschieden ist, wirkt die Parallaxe in entgegengesetztem Sinne; wenn sie die Länge des einen verkleinert, vergrößert sie die Länge des anderen und umgekehrt. Demnach ist die Differenz der scheinbaren Länge oder auch Rektaszension beider abhängig von der Summe ihrer Parallaxen. Auf diesem schon von Römer 1701 versuchten Wege leitete Bessel aus Bradleys Beobachtungen ganz befriedigende Resultate ab. Struve zeigte dann, daß man die bei einem zwölfstündigen Intervall sehr leicht verderblichen Fehler der Aufstellung und des Ganges der Uhr im wesentlichen eliminieren kann durch die Verbindung der Zeiten des Durchganges durch die obere oder untere Kulmination bei zwei um 12^h voneinander abstehenden Zirkumpolarsternen. In der Praxis sind diese beiden an sich sehr aussichtsreichen Methoden nur einer sehr beschränkten Anwendung fähig wegen der Forderungen, die sie an die gegenseitige Stellung der Sterne stellen. Geht man aber nicht auf die Bestimmung der Summe zweier Parallaxen aus, sondern begnügt man sich mit der Bestimmung der Differenz der Parallaxen, so tritt an die Stelle einer Verschiedenheit um zwölf Stunden die der nahen Gleichheit der Rektaszensionen der Sterne, und auch in dieser Form hat Bessel die Methode schon angewandt. Die vollkommeneren Hilfsmittel der neueren Zeit ließen diesen letzteren Weg auch neben den mikrometrischen Methoden aussichtsreich erscheinen. Mit der photographischen hat diese Methode den Vorzug gemein, daß die Beobachtungen gleichzeitig eine größere Zahl von Objekten umfassen können. Nachdem die Methode sich bei mehreren größeren Beobachtungsreihen bewährt hatte, ist sie jetzt unter Führung der Astronomischen Gesellschaft

Rektaszensionsdifferenzen.

für eine sich auf alle helleren Sterne bis zur siebenten Größe erstreckende parallaktische Durchmusterung des Himmels, an der eine größere Zahl von Sternwarten sich beteiligen müßte, in Vorschlag gebracht. Mit der Bearbeitung der Zone $+15^0$ bis $+20^0$ ist die Münchener Sternwarte vorangegangen.

Der Übergang von der relativen Parallaxe, wie wir sie als Resultat bei allen zuletzt behandelten Methoden erhalten, zum absoluten Werte der Parallaxe verlangt noch eine Schätzung der Entfernung der Vergleichsterne, die wir nur auf Grundlage allgemeiner Betrachtungen über die Anordnung der Sterne verschiedener Helligkeit erlangen können.

Mittelbare Bestimmung.

In manchen Fällen, in denen die unmittelbare Messung aussichtslos ist oder versagt, führen andere Wege dennoch zum Ziele. Bei Doppelsternen haben wir in dem dritten Keplerschen Gesetze eine Beziehung zwischen der Umlaufszeit, der Masse des Systems und dem linearen Abstande der Komponenten. Mit einer plausiblen Annahme über die Masse auf Grund unserer sonstigen Kenntnis dieser Verhältnisse gibt uns also die bekannte Umlaufszeit die lineare Entfernung der Komponenten, und verbinden wir damit die gemessene Entfernung in Bogenmaß, so erfahren wir die Entfernung des Systems von uns in linearem Maße. Dieser Weg führte Bessel zu einer nahe richtigen Schätzung der Parallaxe von 61 Cygni, noch bevor er sie durch direkte Beobachtungen kannte. Auch Messungen der Bewegung der Komponenten eines Doppelsterns im Visionsradius führen zum Ziele. Sie lehren uns die lineare Geschwindigkeit der Bahnbewegung kennen. Die aus den Messungen des Abstandes und der Richtung der Verbindungslinie der beiden Sterne berechnete elliptische Bahn des Systems bestimmt ihrerseits den Winkelwert der Umlaufsgeschwindigkeit, und aus der Verbindung beider Werte erhalten wir wieder die Entfernung des Systems von uns. Ein weiteres Hilfsmittel zur Entfernungsbestimmung haben wir in der Vergleichung der scheinbaren und der absoluten Helligkeit der Sterne. Die Verschiedenheit des Glutzustandes der Sterne kommt in ihrem Spektrum zum Ausdruck. Es ist Kohlschütter gelungen, durch vergleichendes Studium eines großen am Mt. Wilson-Observatorium gesammelten Plattenmaterials die Kriterien im Verhalten bestimmter Linien in den Spektren aufzufinden, die über den Glutzustand Aufschluß geben und einen Schluß auf die absolute Helligkeit und damit auf die Entfernung gestatten. Die Erforschung des Baus des Fixsternsystems und der Bewegungsverhältnisse in demselben hat weiter noch eine Reihe von Gesichtspunkten ergeben, nach denen wir die räumliche Anordnung großer Sterngruppen einigermaßen beurteilen, ihre Entfernung vom Sonnensystem abschätzen können. Darüber wird später eingehender zu sprechen sein.

Ergebnisse.

Bestimmungen der Entfernung durch die Messung der Parallaxe sind zur Zeit für etwa 500 Sterne ausgeführt. Für einen erheblichen Teil dieser untersuchten Sterne darf man das Resultat aber nicht als hinreichend gesichert betrachten, und für mindestens $^1/_3$ der Sterne ist der der Bestimmung

noch innewohnende rechnungsmäßige wahrscheinliche Fehler ebenso groß oder sogar größer als das Resultat selbst. Für viele der untersuchten Sterne ist die Parallaxe so klein, daß es mit den gegenwärtigen Hilfsmitteln gar nicht möglich ist, den wahrscheinlichen Fehler unter den Betrag der Parallaxe selbst herabzudrücken, und da die untere Grenze der mit den besten Hilfsmitteln erreichbaren Genauigkeit etwa 0″.01 beträgt, so können wir für diese Sterne also nur aussagen, daß ihre Parallaxe kleiner als 0″.01 ist. *Nur ein positiver Wert der Parallaxe hätte Berechtigung; wenn also die Beobachtung auf einen negativen Wert der relativen Parallaxe führt, so hätten wir das Resultat so zu deuten, daß der Stern, dessen Entfernung bestimmt werden sollte, weiter entfernt sei als die schwachen Sterne, mit denen er verglichen ist. Im einzelnen Falle hat ein solches Resultat keinen Wert, es sind aber diese negativen Werte von Bedeutung für die Bestimmung der mittleren Entfernung der Sterne.

Das zur Zeit zur Verfügung stehende Material ist nicht derart, daß man auf dasselbe allein allgemeingültige Schlüsse über die Sternverteilung gründen dürfte. Die der Untersuchung unterworfenen Sterne sind nicht willkürlich, sondern zu einem großen Teile nach Gesichtspunkten ausgewählt, die von vornherein eine größere Parallaxe wahrscheinlich machen mußten. Als Kriterium besonderer Nähe dienten dabei teils große scheinbare Helligkeit, teils starke Eigenbewegung.

In der folgenden Tabelle ist für die 21 hellsten Sterne des Himmels der aus Heliometermessungen am Kap der Guten Hoffnung und in Newhaven gefundene Wert der Parallaxe angegeben.

Parallaxen der Sterne erster Größe.

α Eridani, Achernar . . .	0″.043	β Crucis	0″.000
α Tauri, Aldebaran	0.109	α Virginis, Spica	—0.019
α Aurigae, Capella	0.079	β Centauri	0.030
β Orionis, Rigel	0.000	α Bootis, Arcturus	0.066
α Orionis, Beteigeuze . . .	0.024	α Centauri	0.752
α Argus, Canopus	0.000	α Scorpii, Antares	0.021
α Canis maj., Sirius	0.370	α Lyrae, Wega	0.082
α Canis min., Procyon . . .	0.334	α Aquilae, Atair	0.232
β Geminorum, Pollux . . .	0.056	α Cygni, Deneb	—0.012
α Leonis, Regulus	0.024	α Piscis austr., Fomalhaut .	0.130
α Crucis	0.050		

Nur ein kleiner Teil des Raumes, den wir als in den Bereich unserer jetzigen Messungsgenauigkeit fallend annehmen dürfen, hat bisher vollständig erforscht werden können. Beschränken wir uns auf eine der Parallaxe 0″.2 entsprechende Entfernung, also auf ein wenig mehr als eine Million Erdbahnradien, so haben wir ein Gebiet, von dem wir uns als ziemlich vollständig unterrichtet betrachten dürfen. Dieses Gebiet enthält die in der folgenden Zusammenstellung aufgeführten Sterne.

Sterne in der Nähe der Sonne.

Name	Ort für 1900.0	Größe	Parallaxe	Entfernung		Eigenbew.		Radialgeschw.	Absolute Helligk.	Spektrum	
				Sternweiten	Lichtjahre	Bog.	km	km		Pickering	Vogel
α Centauri	$14^h32^m.8$ $-60°25'$	0.1	0″.752	1.3	4.3	3″.7	23	−22	51	G u. K 5	IIa
Proxima Centauri	14 22.8 −62 15	11.0	0.78	1.3	4.2	3.8	23		1/490		
Barnards Velox	17 52.9 + 4 25	9.4	0.62	1.6	5.3	10.3	79	−106	1/70	Mb	
Lal. 21185	10 57.9 +36 38	7.6	0.392	2.5	8.3	4.7	57	−87	1/5	Ma	IIIa
Sirius	6 40.7 −16 34	−1.6	0.370	2.7	8.8	1.3	17	−7	1000	A	Ia
Procyon	7 34.1 + 5 29	0.5	0.334	3.0	9.8	1.2	17	−4	177	F 5	IIa
G. Z. 5^h243	5 7.7 −44 59	8.3	0.312	3.2	10.4	8.7	132	+242	1/5	G—K	IIa
τ Ceti	1 39.4 −16 28	3.6	0.310	3.2	10.5	1.9	29	−16	12	K	IIa—IIIa
ϵ Eridani	3 28.2 − 9 48	3.8	0.307	3.3	10.6	1.0	15	+16	10	K	IIa—IIIa
Gr. 34	0 12.5 +43 27	8.2	0.306	3.3	10.6	2.9	45		1/5	Ma	IIIa
61 Cygni	21 2.4 +38 15	5.1	0.291	3.4	11.2	5.2	85	−63	3	K 5	IIIa
Pos.med.2164	18 41.8 +59 29	8.8	0.290	3.4	11.2	2.3	38		1/10	K	IIa—IIIa
Lac. 9352	22 59.4 −36 26	7.4	0.283	3.5	11.5	6.9	116	+12	2/5	K	IIa—IIIa
ϵ Indi	21 55.7 −57 12	4.7	0.273	3.7	11.9	4.7	82	−39	6	K 5	IIIa
Lal. 21258	11 0.5 +44 2	8.9	0.26	3.8	12.5	4.5	82	+65	1/10	Ma	IIIa
AGHels 13170	22 24.4 +57 12	9.2	0.251	4.0	13.0	0.7	13		1/10		
σ Draconis	19 32.5 +69 30	4.8	0.243	4.1	13.4	1.8	35	+26	6	G 5	IIIa
α Aquilae	19 45.9 + 8 36	0.9	0.232	4.3	14.0	0.6	12	−33	254	A 5	Ia
AOe 17415	17 37.0 +68 26	9.3	0.21	4.8	15.5	1.3	29		1/10	F	Ia—IIa
W 16^h 906	16 50.1 − 8 9	8.8	0.210	4.8	15.5	1.3	29		1/5	K	IIa—IIIa
Sonne									34	G	IIa

Neben der Parallaxe ist in der Zusammenstellung die aus ihr berechnete lineare Entfernung in „Sternweiten" ausgedrückt angegeben. Eine Sternweite, eine Entfernung, in der die Parallaxe eines Sternes gleich einer Bogensekunde sein würde, ist 206 265 mal so groß wie die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne, beträgt also etwa 31 Billionen km. In diesem ungeheuer großen Maßstabe ausgedrückt, würde die Grenze, über die hinaus Entfernungsmessungen mit unseren jetzigen Instrumenten als nicht mehr ausführbar zu betrachten sind, bei 100 liegen. Diese Entfernung entspräche dem $20^1/_2$ millionenfachen des Abstandes der Erde von der Sonne. Als ein zweites einigermaßen ein Verständnis für die ungeheuren Entfernungen der Fixsterne vermittelndes Maß benutzt man die Zeit, die das Licht gebraucht, um von dem betreffenden Sterne in unser Auge zu gelangen, die „Lichtzeit". Würde unsere Sonne plötzlich erlöschen, so würde sie einem Beobachter auf dem uns nächsten Fixsterne doch noch über vier Jahre lang in unverminderter Helligkeit zu leuchten scheinen; einer Sternweite entspricht eine Lichtzeit von 3.26 Jahren.

Die Anzahl der Sterne in dem abgegrenzten Raume ist einschließlich unserer Sonne 21. Wir dürfen es nicht als gewiß hinstellen, daß unsere Zählung alle Sterne in dem Raume umfaßt, wenn wir es auch als wahrscheinlich annehmen können. Übersehen könnten jedenfalls nur sehr schwache Sterne sein, die uns auch die ihnen innewohnende, voraussichtlich große Bewegung noch nicht verraten hätte. Der zweite und dritte Stern der Liste sind Beispiele solcher Fälle. Beide sind erst in den letzten Jahren aufgefun-

den und sind ausgezeichnet, der eine durch seine offenbare Zusammengehörigkeit mit dem aus zwei hellen Sternen bestehenden Systeme α Centauri, der andere als der nach unserer jetzigen Kenntnis stärkst bewegte Stern am Himmel. Wären die Sterne im Raume gleichförmig um die Sonne als Mittelpunkt verteilt, so müßten auf einer um die Sonne mit dem mittleren Abstand je zweier Sterne beschriebenen Kugeloberfläche 16 Sterne liegen. Das Mittel der Entfernungen der ersten 16 Sterne der Liste ist aber 2.95 Sternweiten. Auf jeden Stern fiele also ein kugelförmiger Raum, dessen Radius etwa 1.5 Sternweiten wäre, und in dem mit einem Radius von fünf Sternweiten um die Sonne beschriebenen Raume hätten wir hiernach 37 Sterne zu erwarten. Davon wären uns also jetzt erst etwas mehr als die Hälfte bekannt.

Die weiteren Angaben der Tabelle begründen noch folgende Feststellungen. Die Sterne sind angeordnet nach wachsender Entfernung von der Sonne. Nach Kolumne 7 nimmt mit zunehmender Entfernung die scheinbare Eigenbewegung im allgemeinen ab, während die lineare Bewegung senkrecht zum Visionsradius sich nicht wesentlich ändert. Teilen wir die Zahlen der Tabelle in drei Gruppen, so erhalten wir die Mittelwerte:

Mittlere Parallaxe	Mittlere Eigenbewegung	
0″.72	5″.8	42 km
0.33	3.1	45
0.25	2.9	52

Es bildet aber die Größe der Eigenbewegung kein zuverlässiges Merkmal der Entfernung, denn einer der am stärksten bewegten Sterne des nördlichen Himmels, der Stern Nr. 1830 des Groombridgeschen Sternkatalogs, hat nur eine Parallaxe von 0″.10 bei einer jährlichen Eigenbewegung von 7″.04. In der zehnten Kolumne sind die absoluten Helligkeiten angegeben unter der Annahme der Helligkeit 1000 für den absolut hellsten Stern unserer Nachbarschaft, Sirius. Unserer Sonne kommt in diesem Maße die Helligkeit 34 zu. Unter gleichen Verhältnissen wäre Sirius also 29 mal so hell wie die Sonne. Dagegen würden erst 2400 Körper von der Größe und Leuchtkraft des Barnardschen schnellbewegten Sternes zusammen so hell leuchten wie die Sonne, und der kleine entfernte Begleiter von α Centauri hätte nur den 16000. Teil der Leuchtkraft der Sonne. Es folgt weiter aus den Zahlen, daß die absolute Leuchtkraft der Sterne innerhalb sehr weiter Grenzen schwankt und daß in der Nachbarschaft der Sonne und, da wir für unsere Sonne keinerlei bevorzugte Stellung annehmen dürfen, wohl überall im Raume Sterne der verschiedensten absoluten Helligkeiten nebeneinander vorkommen. Trotz dieser großen Verschiedenheit in der äußeren Erscheinungsform der Sterne unserer Nachbarschaft geht doch aus der Zusammenstellung des Spektralcharakters derselben deutlich ihre Zusammengehörigkeit hervor. Während von der Gesamtheit der helleren Sterne etwa 60 v. H. der I. Klasse und 40 v. H. den Klassen II und III angehören, haben wir hier von 18 (mit Einschluß der Sonne) untersuchten Sternen nur 2 der I. Klasse, dagegen 16 oder 89 v. H. zur II. oder III. Klasse gehörige Sterne.

Über das Verhältnis der Helligkeit zur Bewegung gibt die Tabelle gleichfalls lehrreichen Aufschluß. Für die 9 Sterne, deren absolute Helligkeit größer als 1 ist, finden wir als Betrag der linearen seitlichen Eigenbewegung 35 km, während für die 11 Sterne mit absoluter Helligkeit unter 1 ein Betrag von 58 km folgt, und bei den Radialbewegungen ergibt sich für 6 Sterne mit absoluter Helligkeit über 6 der Wert 15 km, bei 8 Sternen mit absoluter Helligkeit unter 6 aber 80 km. Die Sterne größerer Leuchtkraft haben also eine geringere Geschwindigkeit, und diese Wahrnehmung hat sich nun auch für die Gesamtheit der Sterne als maßgebend erwiesen. Aus dem jetzt vorliegenden großen Material an Radialbewegungen schließen Adams und Strömberg auf eine Zunahme der Radialgeschwindigkeit bei den Sternen des II. und III. Typus um 1.5 km für jede Einheit der absoluten Helligkeit, während eine Abhängigkeit von der Entfernung nicht zum Ausdruck kommt.

Entfernungsgesetz.

Da ohne Zweifel ein inniger Zusammenhang zwischen der Entfernung einerseits und der scheinbaren Helligkeit und der Eigenbewegung andererseits bestehen muß, können wir, solange uns der Ausdruck dieses Gesetzes noch nicht bekannt ist, auf empirischem Wege die Verbindung zwischen den drei Größen kennen zu lernen suchen. Aber zu brauchbaren Resultaten konnte dieser Weg erst führen, als man imstande war, den direkt gemessenen Entfernungen, deren Kenntnis nur bis zu einer verhältnismäßig sehr nahen Grenze erreichbar ist, weitere auf indirektem Wege erschlossene hinzuzufügen. Sie ergeben sich aus der Seite 520 erwähnten Säkularparallaxe, dem Winkel, unter dem die Bewegung des Sonnensystems im Raume von den Sternen einer bestimmten Gruppe aus senkrecht gesehen im Mittel erscheint. Kapteyn gewann diesem Material eine Formel ab, die die Parallaxe darstellt als Produkt dreier Faktoren: der mittleren Parallaxe der Sterne 5. Größe von einer jährlichen Eigenbewegung von 0″.01, einer zweiten von der beobachteten scheinbaren Eigenbewegung und einer dritten von der scheinbaren Helligkeit abhängigen Größe. Diese Formel hat dann später durch Schwarzschild eine theoretische Begründung und Rechtfertigung aus den Grundgesetzen der statistischen Astronomie erhalten und ist durch eine neue Ausgleichung des bis 1915 vorliegenden Materials durch Van Rhijn im wesentlichen bestätigt gefunden, so daß das durch die Formel nach Einführung der neuen Werte der Konstanten gewonnene Urteil über die mittleren Entfernungen von Sterngruppen bestimmter Helligkeit und bestimmter Größe der Eigenbewegung einiges Vertrauen verdienen dürfte.

IV. Ältere Vorstellungen vom Fixsternsystem. Lange bevor noch die Wissenschaft sich die Werkzeuge geschaffen hatte, die an der Hand sicher erkannter und durch mathematisch streng begründete Gesetze verbundener Tatsachen die Erforschung der Gestalt und Ordnung des Weltgebäudes in erfolgversprechende Bahnen lenkten, suchten kühne Geister sich eine alles, was dem Auge sich am gestirnten Himmel darbietet, um-

fassende Vorstellung zu bilden. Mit zwingender Notwendigkeit gehen alle diese Versuche von der fernsten Vergangenheit bis in unsere Tage aus von der wunderbaren, durch einen übermächtigen Eindruck den Beschauer mit einer Ahnung der großen in ihr verborgenen Geheimnisse erfüllenden Erscheinung der Milchstraße. Unser ganzes Erdenleben ist so eng verbunden mit dem Laufe der Sonne am Himmelsgewölbe, der Ekliptik, und alle dem Auge überhaupt zugänglichen gesetzmäßigen Vorgänge am Himmel erscheinen uns so eng verknüpft mit der Ekliptik, daß das offenbare Fehlen jeder Beziehung zwischen der Milchstraße und der Ekliptik ohne weiteres die Überzeugung wachruft, daß uns in der Milchstraße ein bestimmendes Glied einer höheren Ordnung vor Augen tritt. Wie ein glänzendes Band von wechselnder Breite und Helligkeit, in fast der Hälfte ihres Laufes in zwei parallel nebeneinander herlaufende Zweige geteilt, an manchen Stellen stark verästelt, an anderen aus einer Zahl kompakter glänzender Flecken bestehend, zieht sie sich, nahe einem größten Kreise sich anschmiegend, um den Himmel herum, den beiden Himmelspolen bis auf weniger als 30^0 nahekommend. Erst der jüngsten Vergangenheit war es möglich, in die Geheimnisse des komplizierten Baues dieses Ringes etwas weiter einzudringen, sein Wesen und Bruchstücke von Gesetzmäßigkeiten, die in ihm walten, aufzudecken.

Die Milchstraße.

Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts blieb das Wesen der Milchstraße ein der spekulativen Forschung anheimgegebenes Problem. Die Wahrheit in genialer Weise vorausschauend, erklärte schon der Atomistiker Demokritos (460—370 v. Chr.) sie als ein aus einer unermeßlich großen Zahl kleinster Sterne zusammengesetztes Gebilde. Doch dieser richtigen Vorstellung wurden andere phantastische entgegengestellt, so die des Metrodoros, eines Schülers des Demokrit, der in dem glänzenden Streifen am Himmel die nachgelassene Spur einer früheren Sonnenbahn erblickte, oder später, im Anfang des 5. Jahrhunderts, die des Neuplatonikers Macrobius, nach der sie die Zusammenschweißungsstelle der beiden Himmelssphären sein sollte. Das Fernrohr in Galileis Hand löste in Wirklichkeit den Schimmer auf in Sternenwolken, ruhend auf einem weißlichen Hintergrunde. Mit der wachsenden raumdurchdringenden Kraft der Fernrohre schritt die Auflösbarkeit immer weiter und weiter, ward schließlich fast überall eine vollkommene, nur hier und da blieben Nebelspuren zurück. Die photographischen Daueraufnahmen machten dann aber das Bild wieder mannigfaltiger durch Aufdecken wunderbarer Einzelheiten, wie Höhlen und Risse, weit verbreiteter oder an anderen Stellen streifenartiger, verschlungener, von Stern zu Stern ziehender Nebelmassen. Als ein weiterer Fingerzeig auf die Bedeutung und die bevorzugte Stellung der Milchstraße bietet sich dem Auge unmittelbar die Anordnung der glänzenderen Sterne in bezug auf die Milchstraße dar. In unverkennbarer Weise schmiegen diese Sterne sich dem Zuge der Milchstraße an. Schon Kant nahm die später durch genauere Zählungen erwiesene Tatsache der Zunahme des Sternenreichtums des Himmels mit der Annäherung

Bedeutung der Milchstraße.

an die Milchstraße wahr. So drängte sich denn bald die Überzeugung auf, daß der Milchstraße eine besondere Rolle zufalle, die ihr im Fixsternsystem eine Bedeutung beilege, wie sie in den kleinen Verhältnissen unseres Sonnensystems die Ekliptik spielt. Damit war die Vorstellung eines höheren Systems gegeben, dem unser Sonnensystem als eines der ungezählten untergeordneten Glieder angehört. Weiter führte nun aber das einfache Schauen nicht, und es blieb zunächst der Phantasie überlassen, sich auf Analogieschlüsse stützend, auf dieser Grundlage weiter zu bauen. Aufbau des Sternsystems.

Das mangelnde Verständnis für die wahren Entfernungen der Sterne ließ anfangs noch Vorstellungen entstehen, die von der Wirklichkeit weit ablagen. Kepler stellte die Sonne nahe in den Mittelpunkt einer Hohlkugel, deren nur dünne Wandung von den Fixsternen gebildet wird. Die Entfernung der Fixsterne voneinander muß erheblich kleiner sein als der Radius der Hohlkugel, der Abstand der Sterne von uns. Denn Saturn, der äußerste der Kepler bekannten Planeten, steht 2000 Sonnenradien vom Sonnenmittelpunkte ab, die Harmonie der Welten verlangt dann, daß die Grenze des Raumes 2000 mal 2000, also 4 Millionen Sonnenradien vom Sonnenmittelpunkte liege. Von der Gesamtmasse des ganzen Sternsystems ist ein Drittel in der Sonne, ein Drittel in den Planeten und das letzte Drittel in den Sternen konzentriert. Kepler.

Vor der durch das Newtonsche Gravitationsgesetz vermittelten Erkenntnis der Wirkung der Massenverteilung konnten diese Ideen nicht lange standhalten. Schon Huygens stellte die Fixsterne in jeder Hinsicht auf die gleiche Stufe wie die Sonne. Er versuchte auch auf photometrischem Wege eine Schätzung der Entfernung zweier solcher Sonnen und setzte hiernach den Sirius in einen Abstand von 28000 Erdbahnradien, was freilich auch erst etwa $^1/_{30}$ der tatsächlichen Entfernung ist. Huygens.

Unseren heutigen Ansichten recht nahe kam schon die Kantsche Vorstellung vom Universum, die er in seiner „Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ (1755) entwickelte. Kant spricht klar und deutlich die Unendlichkeit des Raumes aus, indem er die Entfernung der Milchstraße unendlich klein im Vergleich zu den Dimensionen des Universums nennt. Er legt den Fixsternen dieselbe Bedeutung wie Huygens bei und nimmt das Walten des Gravitationsgesetzes für den ganzen Weltenraum als selbstverständlich an. Die sichtbaren Sterne mitsamt der Milchstraße denkt er sich in ein System vereinigt, dessen Grundebene die Ebene der Milchstraße ist. Im Mittelpunkte der Milchstraße liegt der Schwerpunkt unseres Sternsystems, und in demselben nimmt er eine den ungeheueren Dimensionen des Systems entsprechende Masse an. Er vermutet diese Masse im Sirius, der in der Verlängerung einer vom breitesten, glänzendsten und also nächsten Teile der Milchstraße, im Schwan, auf die Sonne zu gezogenen Linie steht. Um diesen Zentralkörper und mehr oder weniger in der Fundamentalebene führen die Sonnensysteme, deren Zentralkörper die einzelnen Fixsterne bilden, ihre Bewegungen aus. Alle Sonnen sind gegen diese Ebene Kant.

zusammengedrängt, wodurch eben der Anblick der Milchstraße entsteht. Gestützt auf die meist elliptische Form der ihm bekannten Nebelflecken, hält er endlich diese für dem unsrigen analog gebildete Sternsysteme und reiht so im unendlichen Raume Milchstraßensystem an Milchstraßensystem, wieder unterworfen dem Gravitationsgesetze, das sie vermutlich wieder zu einem System höherer Ordnung verbindet. Im unendlichen Raume findet so die Vorstellung von niederen zu höheren Systemen aufsteigend niemals Schranken.

Lambert. Die Hauptideen dieses Kantschen Entwurfes kehren wieder in dem Lambertschen Weltenbilde, das dieser unabhängig von Kant in seinem Buche „Kosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues" (1761) entwirft. Lambert ist aber der erste, der die kurz zuvor entdeckten Bewegungen der Fixsterne als einen bestimmenden Faktor in seine Vorstellung einführt. Dort, wo die Milchstraße uns am glänzendsten erscheint, erweckt sie unmittelbar den Eindruck, als wäre sie durch eine Aneinanderreihung glänzender Lichtballen gebildet. Daraus gewinnt Lambert die Vorstellung, das ganze im Milchstraßengebilde vereinigte Sternenheer zerfalle in eine große Zahl von Sternhaufen, die jeder ein Fixsternsystem für sich bilden. Er nennt sie Systeme 3. Ordnung. Unsere Sonne bildet mit den uns sichtbaren isolierten Sternen gleichfalls ein solches System 3. Ordnung. Sie selbst, wie alle anderen einzelnen Sterne, ist der Zentralkörper eines Systems der 2. Ordnung, eines Planetensystems, und jeder Planet bildet mit seinen Monden ein System 1. Ordnung. Wie die Systeme der 1. und 2. Ordnung müssen auch die Systeme der 3. Ordnung einen Zentralkörper von überwiegender Masse haben, der die Bewegungen reguliert und Zusammenstöße der einzelnen Glieder des Systems verhindert, denn Lamberts Philosophie verlangt eine unbegrenzte Lebensmöglichkeit auf allen Himmelskörpern. Eine leuchtende Zentralsonne von der erforderlichen Masse und Größe in unserem Fixsternsysteme, dem Sonnensternhaufen, vorauszusetzen, scheint aber den tatsächlichen Wahrnehmungen zuwiderzulaufen. Hingegen hindert nichts, einer ungeheuren dunklen Masse die Rolle der Beherrscherin des Systems zuzuweisen, und als auf Spuren einer solchen deutet Lambert auf den großen Orionnebel hin. Ihm hatte schon Huygens, von dem seine erste Beschreibung stammt, geheimnisvolle Bedeutung beigelegt. Lambert erblickt in ihm einen selbstleuchtenden oder durch eine nahestehende Sonne erleuchteten Flecken auf dem riesigen Zentralkörper unseres Sternhaufens, und er wird in dieser Erklärung noch bestärkt durch die anfangs vermutete Veränderlichkeit des Orionnebels, die er der Rotation des Zentralkörpers zuschreibt. Die Systeme der 3. Ordnung, die Sternhaufen, sind nebeneinander um eine Fundamentalebene, aus der sie sich nicht weit entfernen, gelagert, sie bilden in ihrer Gesamtheit einen linsenförmigen Körper, der sich uns in dem Gesamtbilde der Milchstraße darstellt. Die Forderung der Stabilität der Systeme 3. und 4. Ordnung, die notwendig ist, wenn die Welt, der Philosophie der damaligen Zeit entsprechend, die vollkommenste sein

soll, bedingt hinreichend große Entfernungen zwischen den Sternen in den Systemen dritter Ordnung und noch größere zwischen diesen Systemen. So wird Lambert dazu geführt, die nächsten nicht mehr zu unserem Sonnensternhaufen gehörigen Sterne in eine Entfernung von 750 Siriusweiten zu versetzen und die Ausdehnung des ganzen Milchstraßensystems auf 150000 Siriusweiten anzugeben.

Wir können diese kosmogonischen Versuche nicht an uns vorübergehen lassen, ohne uns bewundernd zu fragen, wie es möglich war, daß so manche der kühnen Schlüsse, besonders Lamberts, vor der späteren exakten Forschung bestehen bleiben konnten, und müssen die Erklärung dafür darin suchen, daß sich in diesen Ideen nur die Überzeugung von dem ewigen, sich selbst erhaltenden Walten eines obersten Prinzipes, der Gravitation, verkörperte. Der gegen Ende des 18. Jahrhunderts hereinbrechende große geistige Kampf lenkte auch die Erforschung der Frage nach dem Bau des Weltalls aus dem Reiche der Spekulation hinüber auf das Gebiet der Erfahrung und der Sinnenwahrnehmung. Die großen Geister des 17. und 18. Jahrhunderts hatten sich vor allem mit der Ausbildung der geistigen Hilfsmittel beschäftigt, um die Probleme der Himmelsmechanik auf dem Boden des von Kopernikus, Kepler und Newton Geschaffenen einer vollständigen Lösung entgegenzuführen. So war gegen Ende des 18. Jahrhunderts die theoretische Astronomie zu einer hohen Entwicklung und zur völligen Beherrschung des von der praktischen Astronomie Dargebotenen gelangt. Ein Weiterschreiten, das Angreifen neuer Probleme, erforderte neue, von der praktischen Astronomie zu liefernde Tatsachen. Um die Waffen der Himmelsmechanik über die Grenzen des Sonnensystems hinaustragen zu können, mußten zunächst die optischen und mechanischen Hilfsmittel, dem erweiterten Gesichtskreise entsprechend, entwickelt werden. In der Tat heben die großen Errungenschaften, die uns in der Spanne knapp eines Jahrhunderts so manches Rätsel gelöst und uns einen klaren Blick in Einzelheiten wenigstens des großen Mechanismus des Universums gestattet haben, an mit den großen technischen Fortschritten der Neuzeit. Am Ausgangspunkte dieser Periode steht Wilhelm Herschel, der mit den mit eigener Hand geschaffenen Teleskopen von immer mehr gesteigerter Kraft den Himmel durchforschte, die Sternverteilung studierte und auf Grund der erlangten Resultate zu einer in den wesentlichen Punkten noch heute gültigen Vorstellung des Fixsternsystems gelangte. Auch die Wege, die zum Verständnis der Fixsternbewegungen führten, sind von Herschel vorgezeichnet und gaben ihm selbst schon ein der Wahrheit sehr nahekommendes Resultat in einer auf das Sternbild des Herkules zu gerichteten Bewegung des Sonnensystems im Raume. Als völlig gesichertes Ergebnis der Herschelschen Arbeiten haben wir auszusprechen: Die Milchstraße ist eine Anhäufung teils dicht gedrängter, teils lockerer Sternhaufen, die in einer verhältnismäßig dünnen, sich in unmeßbare Entfernungen ausdehnenden Schicht angeordnet sind. W. Herschel.

Die Eigenbewegungen der Fixsterne waren durch Herschels Arbeiten, die schon zur Erkenntnis des systematischen Charakters derselben führten, in den Mittelpunkt der ganzen Frage gerückt, und ihre Ermittlung und möglichste Sicherung durch Steigerung der Genauigkeit der Beobachtungen und der Reduktionsmethoden stand in den auf Herschels Wirken folgenden Jahrzehnten im Vordergrund der astronomischen Interessen. Sobald man zu einer umfassenderen Kenntnis dieser Bewegungen gelangt war, wurden, allerdings vorzeitig, von Argelander und von Mädler Theorien derselben aufgestellt. Argelander prüfte die Vorstellung eines nach Analogie des Sonnensystems aufgebauten Fixsternsystems mit zentraler, weit überwiegender Masse. In ihm hätten wir nahe kreisförmige Bewegungen zu erwarten, die in einer Ebene, als welche nur die Ebene der Milchstraße angenommen werden kann, erfolgen und um so größer werden, je näher man dem Zentrum der Bewegung kommt. Dieses Zentrum ist in einer zur Bewegungsrichtung des Sonnensystems im Raume senkrechten Richtung zu suchen. Diese beiden Forderungen führten dazu, den Zentralkörper im Sternbild des Perseus zu vermuten. Die rechnerische Prüfung der Hypothese führte aber zu unbefriedigenden Resultaten und zum Fallenlassen derselben. Mädlers Hypothese verwarf den Zentralkörper ganz. Das Sternsystem wird gedacht als gebildet aus einer großen Zahl von Körpern, die in einem kugelförmigen Raume verteilt sind und sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. In einem solchen System wächst die Anziehungskraft proportional mit dem Abstande vom Mittelpunkte, die Umlaufszeiten aller Körper des Systems müssen identisch sein, die lineare Größe der Bewegung zunehmen mit der Entfernung vom Mittelpunkte. Die Plejadengruppe scheint Mädler die geeignetste zu sein, um in den Mittelpunkt des ganzen Systems gesetzt zu werden, und in ihrer Mitte vermutet er denselben. Alcyone, der hellste Stern der Plejaden, ist möglicherweise das in nächster Nähe den Schwerpunkt umkreisende Glied des Systems. Die numerische Prüfung der Hypothese an den beobachteten Bewegungen kann aber auch nicht zum Beweise derselben führen, weil das Material dazu noch bei weitem nicht reif ist.

Argelanders Hypothese.

Mädlers Hypothese.

Wenn auch dieser Mädlersche Versuch, dessen Grundgedanke den wirklichen Verhältnissen vielleicht entsprechen dürfte, nicht zum Ziele führen konnte, so lag das daran, daß man die Tragweite der in den Eigenbewegungen beobachteten Gesetzmäßigkeiten weit überschätzte. Wir erkennen das am besten, wenn wir die damaligen tatsächlichen Kenntnisse in Vergleich stellen mit denjenigen, über die wir jetzt verfügen: Um die Mitte des 19. Jahrhunderts gelang die erste zuverlässige Entfernungsbestimmung eines Sternes, durch die der Übergang von der angulären Bewegung, die aus der Ortsbestimmung sich direkt ergibt, auf die lineare möglich wurde; im letzten Dezennium des 19. Jahrhunderts wurde der Weg aufgedeckt, der uns aus der Verschiebung der Spektrallinien eine Bestimmung der zweiten Komponente der Bewegung, der in die Gesichtslinie fallenden, direkt in linearem Maße ermöglichte. Für eine zwar noch sehr beschränkte Zahl von Sternen

können wir aus diesen drei Daten die totale Bewegung im Raume ihrem linearen Betrage und ihrer Richtung nach berechnen. Welch großer Fortschritt ist das gegenüber den dürftigen Kenntnissen jener früheren Zeit! Trotzdem sind die Schwierigkeiten der Aufgabe kaum geringer geworden, und wir müssen uns damit begnügen, ein Weltenbild nur in großen Zügen zu entwerfen, das die charakteristischen Ergebnisse unserer Beobachtungen und der an sie geknüpften Folgerungen wiedergibt.

Das Beobachtungsmaterial, das uns zur Verfügung steht, ist gegeben in Sternzählungen, in Parallaxenbestimmungen, in Bewegungen und in den spektralen Eigenschaften der Sterne. Wir ordnen dieses Material zunächst, um einen Überblick zu gewinnen und die Beziehungen zu erkennen, welche zwischen der Verteilung der Sterne im Raume, der Verteilung nach der Größe der linearen Bewegung und der Verteilung nach der absoluten Helligkeit bestehen. Das sind die drei Grundlagen zur Erkenntnis der Anordnung des Sternsystems und der Bewegungen in demselben.

V. Die Sternverteilung. Die räumliche Anordnung der Sterne muß, wenn sie bestimmten Gesetzen unterworfen ist, zum Ausdruck kommen in einer gesetzmäßigen Verteilung der Sterne über die Sphäre. Dieser Gedanke bildet die Grundlage der frühesten Theorie des Sternsystems, und von ihm gingen auch wieder Herschels Untersuchungen aus. Das Neue, was Herschel hinzufügte, war die Erkenntnis, daß man unter bestimmten Voraussetzungen aus der Sternverteilung auf die Entfernung der Grenzschicht des mit Sternen erfüllten Raumes schließen könne. In einem bestimmten Areale am Himmel erblicken wir alle jene Sterne, die sich in einem Kegel befinden, dessen Spitze im Auge des Beobachters liegt und dessen Grundebene die aus dem Himmel ausgeschnittene Fläche ist. Kennten wir die Entfernung der Grenzschicht, d. h. die Höhe des Kegels, und außerdem das Gesetz der Sternverteilung, so würden wir die Sternzahl in dem Kegel ausrechnen können, und umgekehrt ließe sich bei gegebener Kenntnis der Sternverteilung aus der Zahl der Sterne im Kegel auch die Höhe des Kegels berechnen. Die Sternverteilung kennen wir nicht, wir sind gezwungen, um den Gedanken zu verwerten, über dieselbe eine Annahme zu machen, und die nächstliegende, die wir zu prüfen hätten, wäre diejenige einer gleichförmigen Verteilung der Sterne im Raume. Weiter müssen wir aber noch voraussetzen, daß wir wirklich alle in dem Kegel befindlichen Sterne auch zählen können, daß sie uns sichtbar sind. Wäre das nicht der Fall, weil unsere Wahrnehmung nur bis zu einer beschränkten, nach allen Richtungen gleichen Entfernung in den Raum eindringt, so müßte die Zahl der Sterne in einem Areal von bestimmter Größe bei gleichförmiger Verteilung der Sterne im Raume und bei gleicher Leuchtkraft aller Sterne überall am Himmel die gleiche sein. Das unbewaffnete Auge reicht bestimmt nicht bis an die Grenze des Sternsystems, denn sonst dürfte ja bei Benutzung eines Fernrohres die Zahl der zu erkennenden

Herschels Sterneichungen.

Sterne nicht größer werden. Die Verteilung der dem freien Auge sichtbaren Sterne ist daher auch nahezu gleichförmig, wenigstens ist eine Ungleichförmigkeit auf den ersten Blick nicht zu erkennen, wenn sie auch in der Tat vorhanden ist; nach Houzeaus Zählung enthält eine 60° breite die Milchstraße symmetrisch umschließende Zone, die genau die Hälfte des ganzen Himmels umfaßt, 3154 Sterne, während die beiden übrigbleibenden Kalotten, die die zweite Hälfte des Himmels einschließen, nur 2565 Sterne enthalten. Soweit unser Auge reicht, wäre also die Voraussetzung gleichförmiger Verteilung der Sterne wenigstens nahezu erfüllt.

Solange man die Entfernung der Sterne nicht kannte, konnte man über ihre absolute Leuchtkraft nichts aussagen, sondern konnte die verschiedene scheinbare Helligkeit nur erklären durch Verschiedenheit der Entfernung. W. Herschels Methode der Sterneichungen bestand nun darin, daß er mit einem seiner großen Spiegelteleskope die Anzahl der Sterne im Gesichtsfelde an 1088 verschiedenen Stellen des Himmels abzählte. Später führte sein Sohn J. Herschel am Kap der Guten Hoffnung noch 2299 Eichungen am Südhimmel aus. Unter der Annahme gleichförmiger Verteilung der Sterne im Raume und gleicher mittlerer Leuchtkraft der Sterne berechnete W. Herschel dann aus der beobachteten Sternzahl die Höhe des Kegels ausgedrückt in Einheiten der Entfernung des Sirius von der Sonne, einer Siriusweite. Während an einzelnen Stellen des Himmels nur zwei oder drei Sterne im Gesichtsfelde erschienen, war an der reichsten Stelle die Anzahl 588. Durch Zusammenstellung der Messungen zu einem die Milchstraße senkrecht durchschneidenden Querschnitte durch das Sternsystem erhielt Herschel hieraus als Gestalt des Sternsystems einen linsenförmigen Körper. Die größte Ausdehnung ist 849, die Dicke nur 155 Siriusweiten. Nach der einen Seite ist die Linse in zwei Scheiben gespalten, die sich in einer Entfernung von 220 Siriusweiten trennen und dann bis 497 bzw. 420 Siriusweiten reichen.

Die Fortsetzung seiner Studien führte Herschel schon selbst zu der Erkenntnis, daß die Voraussetzungen, von denen er ausgegangen war, nicht erfüllt seien. Die Entdeckung der Doppelsternsysteme offenbarte das Walten der Gravitation auch in den Tiefen des Raumes und legte damit den Gedanken nahe, daß durch sie eine Zusammenordnung einer größeren Zahl von Sternen zu besonderen Systemen erfolgen könne, wodurch die gleichförmige Verteilung ausgeschlossen ist. Die Entdeckung der auch durch das stärkste Fernrohr nicht in Sterne auflösbaren Nebelmassen, die Herschel richtig als selbstleuchtende Nebelmassen erklärte, machte die Annahme gleicher absoluter Helligkeit der Sterne unwahrscheinlich, und schließlich bewies der Umstand, daß an manchen Stellen der Milchstraße auch im größten Teleskop immer noch ein weißer Hintergrund blieb, der bei Anwendung noch stärkerer Hilfsmittel voraussichtlich sich in Sterne auflösen würde, daß hier sein Instrument nicht bis an die Grenze des Sternsystems eindrang.

Herschels photometrisches Verfahren.

Ein besser begründetes Urteil über die Ausdehnung des Sternsystems

in der Richtung der Milchstraße suchte Herschel dann in folgender Weise zu gewinnen. Er benutzte zwei Fernrohre von verschiedener Öffnung, von denen er durch Versuche an irdischen Objekten festgestellt hatte, daß ein und dasselbe Objekt in dem stärkeren Fernrohr in der doppelten Entfernung dieselbe Helligkeit habe wie mit dem schwächeren in der einfachen Entfernung. Er richtete nun das schwächere Fernrohr auf einen Stern erster Größe und suchte dann mit dem stärkeren Fernrohr einen anderen Stern, der in ihm dieselbe Helligkeit hatte wie der Stern erster Größe in dem schwächeren Rohre. Bei gleicher absoluter Leuchtkraft mußte dann dieser zweite Stern in der doppelten Entfernung des Sternes erster Größe stehen. Auf demselben Wege konnte er Sterne finden, die in der 4-, 8-, 16-.....fachen Entfernung der Sterne erster Größe sich befanden. Auf diesem Wege ermittelte er zunächst, daß die dem freien Auge noch eben sichtbaren Sterne in der Entfernung von zwölf Siriusweiten ständen. Bei dem stärksten Fernrohre, das er zur Anwendung brachte, fand er, daß es in der Entfernung 191.75 einen Gegenstand noch ebenso hell zeige, wie ihn das freie Auge in der Entfernung 1 sieht. Die Zahl 191.75 nennt man die raumdurchdringende Kraft jenes Fernrohres. Dort wo dieses Fernrohr also den milchigen Hintergrund in der Milchstraße nicht aufzulösen vermochte, mußte das Sternsystem sich über eine Entfernung von 12×191.75 oder 2300 Siriusweiten hinaus erstrecken. Als Endergebnis dieser Forschungen ist die schon S. 533 angeführte Vorstellung Herschels vom Sternsystem zu betrachten.

Sternzählung nach Größenklassen.

Wenn nun auch die Methode der Sterneichungen nicht unmittelbar zum gewünschten Ziele führte, so bildet sie, richtig angewandt, doch ein Hilfsmittel von größtem Werte. Die Voraussetzung gleicher absoluter Leuchtkraft der Sterne ist, wie wir aus der Tabelle auf S. 527 wissen, nicht gestattet, sie ist aber auch nicht nötig. Die Methode darf ohne Änderung auch noch angewandt werden, wenn nur überall im Raume die Verteilung der Sterne nach den verschiedenen Stufen der absoluten Leuchtkraft durchschnittlich die gleiche ist. Denn dann würden für die einzelnen Helligkeitsstufen die Zahlen der Herschelschen Voraussetzung entsprechend wachsen, also auch für alle Helligkeitsstufen zusammengenommen. Wenn weiter die Voraussetzung gleichförmiger Verteilung der Sterne im ganzen Raume nicht erfüllt ist, so wird sich das darin zeigen, daß die scheinbare Helligkeit nicht entsprechend der aus der Sternzahl geschlossenen Entfernung abnimmt. In der doppelten Entfernung sollte die mittlere scheinbare Helligkeit auf $\frac{1}{4}$ gesunken sein. Fänden wir in der, nach der Sternzahl beurteilt, doppelten Entfernung eine geringere Helligkeit, so folgte daraus, daß die wirkliche Entfernung mehr als das doppelte ist, und da die Sternzahl nicht entsprechend gewachsen ist, so müssen die Sterne weniger dicht stehen. Es muß also mit dem Zählen der Sterne eine Schätzung ihrer Helligkeit verbunden werden, oder man muß die Zählungen für die Sterne der einzelnen Helligkeitsabstufungen getrennt ausführen. Mit diesen Einschränkungen angewandt, ist

die Methode der Sterneichungen durchaus berechtigt und geeignet, uns zu wichtigen Aufschlüssen zu führen.

Nur eine systematische Durchmusterung des ganzen Himmels, die die Sterne mit ihrer scheinbaren Helligkeit verzeichnete, konnte da ein Material liefern, das nach den verschiedensten Richtungen hin verwertbar war. Versuche, solche Sternverzeichnisse anzulegen, waren, allerdings aus anderen Beweggründen, schon von mehreren Beobachtern aus dem Ende des 18. Jahrhunderts und der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts unternommen. Es sind die Zonenbeobachtungen, die von Lalande (um 1800), von Bessel (um 1825), von Argelander (um 1842) ausgeführt sind und die darin bestanden, daß der Beobachter die Durchgangszeiten und Deklinationen aller das Gesichtsfeld eines während des betreffenden Beobachtungssatzes immer nahezu auf dieselbe Deklination eingestellten Meridianinstrumentes passierenden Sterne beobachtete mit Angabe ihrer Größe. Entsprechend der Hellig eitsgrenze, bis zu der man mit den üblichen Meridianinstrumenten noch Sterne sicher zu beobachten vermag, gehen diese Zonen bis zur neunten Größe. Die Besselschen Zonen, die sich auf den zwischen den Parallelkreisen -15^0 und $+45^0$ liegenden Teil des Himmels beziehen, wurden auch in der Tat von W. Struve zu einer Untersuchung über die Konstitution des Fixsternsystems benutzt. Sie konnten aber nur zu Resultaten von zweifelhaftem Werte führen, weil sie eine der wesentlichsten Bedingungen, die an das Material zu stellen ist, nicht erfüllten, nämlich die der Vollständigkeit. Angestellt nur zu dem Zwecke, ein engmaschiges Netz gut bestimmter Fixpunkte am Himmel zu beschaffen, mit deren Hilfe man jedes andere Objekt durch Differenzenmessungen leicht festlegen könne, strebten sie in den sternreichen Gegenden die möglichste Vollständigkeit gar nicht an.

Zonenbeobachtungen.

Dieses Ziel und gleichzeitig die genauere Bestimmung der scheinbaren Helligkeit der Sterne erreichte erst Argelander, als er es mit seinen Mitarbeitern Krueger und Schönfeld unternahm, ein Verzeichnis aller Sterne des nördlichen Himmels bis zur neunten Größe aufzustellen. Diese große Arbeit, mit der eine neue Epoche in der Geschichte der Himmelsforschung anhebt, wurde in den Jahren 1852 bis 1859 in Bonn ausgeführt. Das Resultat der Arbeit war ein Katalog, der die genäherte Position und die Helligkeit von 324188 Sternen nördlich vom Parallelkreise -2^0 gibt. Schönfeld führte die Arbeit später in Bonn noch bis zum Parallelkreis von -23^0 fort und fügte hier weitere 133659 Sterne hinzu. Die Fortsetzung auf der Südhemisphäre wurde von der Nationalsternwarte in Cordoba unternommen. Soweit schon publiziert, reicht sie bis zum Parallelkreise von -62^0 und enthält in der Zone -22^0 bis -62^0 578802 Sterne. Die Fortsetzung bis zum Südpole ist in Arbeit. Diese Cordobaer Durchmusterung geht in der Grenzgröße etwas weiter als die beiden Bonner Durchmusterungen, indem sie Sterne bis zur zehnten Größe verzeichnet. Diese Durchmusterungskataloge wurden gleichzeitig auch in Karten niedergelegt, die uns also ein getreues Bild des Himmels, wie er sich gegenwärtig in mittleren Fernrohren

Bonner und Cordobaer Durchmusterung.

darstellt, geben. Für die praktische Astronomie sind diese Karten ein Hilfsmittel von außerordentlicher Wichtigkeit, da sie eine schnelle Orientierung und die Erkennung jedes Neulings am Firmament, soweit er eben in den Bereich der Durchmusterung fällt, gestatten. Noch größer aber ist vielleicht ihre Bedeutung für die Erforschung der Struktur des Universums. In allen Einzelheiten steht das derzeitige Bild des Firmamentes klar gezeichnet vor unsern Augen. Wir brauchen nur zu überdenken, welch kostbares Gut für uns eine vor Hunderten von Jahren nach denselben Prinzipien gezeichnete zweite Karte des Himmels sein würde, um den bleibenden und ständig sich vergrößernden Wert dieser Schöpfung zu ermessen.

Photographische Himmelskarte.

Durch das Hilfsmittel der Photographie wurde den Aufgaben der Sternzählung ein neues, in seiner Fülle kaum zu bewältigendes Material erschlossen. In systematischer Weise wurde zuerst zu Anfang des 20. Jahrhunderts auf den Sternwarten des Harvard College zu Cambridge und Arequipa unter E. C. Pickerings Leitung eine photographische Karte des ganzen Himmels angefertigt. Sie gibt auf 115 sich schindelförmig überdeckenden Platten, deren jede ein Areal des Himmels von mehr als 30^0 im Quadrat bedeckt, ein treues bis zur 11. und teilweise bis zur 12. Größe reichendes Bild des Himmels. Eine andere Aufnahme des ganzen Himmels ist in der Zeit von 1905 bis 1909 von J. Franklin-Adams hergestellt. Die 206 Platten, deren jede ein Feld von $15^0 \times 15^0$ bedeckt, sind in Mervel Hill und in Johannesburg aufgenommen, und die Aufnahmen geben über die Sterne bis zur 17. Größe Aufschluß. Noch viel weiter reichende Ziele verfolgt das internationale Unternehmen der Astrographischen Himmelskarte, zu dessen Ausführung sich eine ganze Reihe von Sternwarten zusammengeschlossen haben (vgl. S. 153) und das uns einen Katalog aller Sterne bis zur 11. Größe und in 21600 Karten ein bis zur 13. oder 14. Größe reichendes Bild des Himmels, auf dem jede Himmelsgegend zweimal dargestellt ist, liefern wird.

Gesetze der Sternstatistik.

Verschiedene Versuche sind schon gemacht, um das in so reicher Fülle dargebotene Material für das Studium des Baues des Fixsternsystems auszunutzen. Es handelte sich zunächst um die Beantwortung der Frage, ob die die Dichtigkeit der Sternverteilung repräsentierende Sternzahl und die mit der scheinbaren Helligkeit eng verbundene Entfernung einander entsprechen. Es sind drei verschiedene Gesetze, die hier zusammenwirken:

1. Bei gleichmäßiger Verteilung der Sterne im Raume wächst die Sternzahl mit der Entfernung proportional dem Inhalt der mit der Entfernung um das Auge beschriebenen Kugel, also proportional mit dem Kubus der Entfernung;

2. die scheinbare Helligkeit einer Lichtquelle nimmt ab mit dem Quadrat der Entfernung;

3. nach dem im vorigen Kapitel Gesagten nehmen die den einzelnen Klassen unserer Größenskala entsprechenden Helligkeiten in einem konstanten Verhältnisse ab; die Helligkeit der nächstfolgenden Klasse ist immer 2.5 mal so klein wie die der nächstvorhergehenden. Dabei ist 2.5 ein Näherungswert für die zu dem Logarithmus 0.4 gehörige Zahl (s. S. 377).

Fassen wir zunächst nur die Sterne einer bestimmten absoluten Leuchtkraft, also etwa eines bestimmten Glühzustandes oder einer bestimmten Temperatur ins Auge, so wird nach dem dritten Satze die scheinbare Helligkeit eines dieser Sterne, der uns um eine Größenklasse heller erscheint als ein anderer, 2.5 mal so groß sein wie die des schwächeren. Diese größere scheinbare Helligkeit kann nur durch größere Nähe entstanden sein, und zwar muß nach dem zweiten Satze der 2.5 mal schwächere Stern in einer Entfernung stehen, die 1.585 mal so groß ist als die des helleren, weil $1.585 \times 1.585 = 2.5$ ist. Wenn aber die Sterne gleichförmig verteilt sind, dann stehen nach dem ersten Satze in der Kugel, die zu der 1.585 mal größeren Entfernung gehört, $1.585 \times 1.585 \times 1.585 = 3.98$ mal soviel Sterne. Also müßte die Zahl der Sterne einer bestimmten absoluten Leuchtkraft, wenn wir um eine Größenklasse weiter gehen, immer 4 mal größer werden. Die Zahl der Sterne 1. und 2. Größe müßte 4 mal so groß wie die der Sterne 1. Größe, die Zahl der Sterne 1., 2. und 3. Größe müßte wieder 4 mal so groß wie die der Sterne 1. und 2. Größe sein und so fort. Derselbe Satz gilt auch für die Sterne einer beliebigen anderen absoluten Leuchtkraft, und wenn also überall im Raume der mittlere Zustand der Sterne der gleiche ist, so müßten die Sternzahlen mit der Größenklasse im Verhältnis 4 : 1 wachsen. Genauer wäre statt 4 zu setzen 3.981.

Ergebnisse der Zählungen.

Diese Folgerung aus den gemachten Annahmen wurde unter Benutzung der Bonner Durchmusterung des nördlichen Himmels zuerst von Littrow einer Prüfung unterzogen. Später hat Gould dies für die dem freien Auge sichtbaren Sterne des ganzen Himmels ausgeführt und Schiaparelli unter Einführung der genaueren photometrisch bestimmten Größen der helleren Sterne wiederholt. Eine Erweiterung über die Grenzen der Durchmusterungen hinaus haben Pickering und Seeliger versucht, indem sie die für einzelne Gebiete aus Karten, oder auch aus mit stärkeren Fernrohren ausgeführten Zonenbeobachtungen oder endlich aus den Herschelschen Eichungen entnommenen Sternzahlen für noch schwächere Sterne zu Hilfe nahmen. Durch diese Untersuchungen wurde mit voller Sicherheit erwiesen, daß die Sternzahl mit der Größe in erheblich geringerem Maße zunimmt, als es den Voraussetzungen gleichförmiger Verteilung und gleicher mittlerer Leuchtkraft entsprechen würde. An Stelle des Wertes 3.981 für das Verhältnis der Sternzahlen zweier aufeinanderfolgender Größenklassen, den wir erwarteten, erhalten wir für die in den Bereich der Durchmusterungen fallenden Sterne im Durchschnitt etwa 3.266. Es ergibt sich aber noch weiter, daß diese Zahl nicht konstant, sondern sehr erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Daraus ist also die Folgerung zu ziehen, daß die Voraussetzungen, die dem Werte 3.981 zugrunde liegen, im Sternsystem nicht zutreffen und durch andere ersetzt werden müssen, die sich den Zählungen besser anschließen. Eine weitere Prüfung der sich ergebenden Werte der Verhältniszahl offenbarte eine Abhängigkeit von der Lage der der Abzählung unterworfenen Region zur Milchstraße, die sich dadurch wieder als die Fundamentalebene

des Sternsystems erweist. Für die dem freien Auge sichtbaren Sterne hat die Verhältniszahl an den Polen der Milchstraße nahezu den den einfachen Voraussetzungen entsprechenden Wert, und sie nimmt ab mit der Annäherung an die Milchstraße; für die schwächeren Sterne kehrt sich dieser Gang um; für sie tritt in der Milchstraße der Maximalwert 3.8 bis 3.9 ein, und mit der Entfernung von der Milchstraße wird der Wert kleiner. Er sinkt für die Sterne der Durchmusterungen bis etwa 3.0, für die schwächeren Sterne aber noch wesentlich weiter. Für die schwächeren Sterne nimmt also die Sternzahl in der Milchstraße am stärksten, und zwar nahe so zu, wie es der Voraussetzung gleichförmiger Verteilung im Raume und gleicher mittlerer Leuchtkraft entsprechen würde; je weiter wir uns aber von der Milchstraße entfernen, um so langsamer wird die Zunahme. Dieses abweichende Verhalten der Verhältniszahl tritt um so mehr in Erscheinung, je schwächer die Sterne sind, bis zu denen wir zählen.

Seeligers Untersuchungen.

Durch die mathematische Interpretation der ermittelten Werte der Verhältniszahlen gelangte Seeliger zu einem Ausdrucke für die Dichtigkeit der Sternverteilung. Diese würde mit der Entfernung abnehmen, und zwar um so stärker, je mehr die Verhältniszahl der Sternzahlen von dem normalen Werte abweicht; also am langsamsten in der Milchstraße, am stärksten in der zur Milchstraße senkrechten Richtung. Mit der einfachsten Annahme über die durch die Beobachtungen ohne weitere Hypothesen nicht bestimmbare Verteilung der absoluten Helligkeit der Sterne, nämlich derjenigen gleicher Verteilung überall im Raume, war Seeliger imstande, die Anordnung der Sterne im Raume in großen Zügen anzugeben. Aber die Beweiskraft der Sternzahlen reicht noch weiter. Wäre der Raum bis in unendliche Fernen oder doch wenigstens bis über die Grenzen unseres Wahrnehmungsvermögens hinaus mit Sternen erfüllt und hätten die Gesetze für die Dichtigkeit der Sternverteilung und für die Verteilung der absoluten Helligkeiten gleichfalls Geltung bis in jene Fernen, so müßte auch die Verhältniszahl der Sternzahlen in einer bestimmten Richtung unveränderlich bleiben bis hinab zu den schwächsten Sternen. Tritt eine Änderung der Verhältniszahl ein, so ist die einzige noch übrigbleibende Erklärung dafür die, daß in der der scheinbaren Helligkeit, bei der die Änderung eintritt, entsprechenden Entfernung eine Unstetigkeit in der Anordnung der Sterne vorhanden ist, und die wahrscheinlichste Annahme wäre, daß jene Entfernung die Grenze des Sternsystems bedeute. Diese Auffassung führt dann auf ein endliches Sternsystem, das in der Richtung der Milchstraße sich etwa doppelt so weit erstreckt wie in der darauf senkrechten Richtung. Die entferntesten Sterne der größten absoluten Leuchtkraft würden in der Richtung der Milchstraße uns als Sterne der Größe 13, in der dazu senkrechten Richtung als Sterne 11.5. Größe erscheinen, und daraus folgte, daß die Grenze des Sternsystems in den beiden Richtungen in einer Entfernung von etwa 5000 bzw. 2500 Sternweiten, oder 16000 bzw. 8000 Lichtjahren läge.

Eine Verbesserung der so gefundenen ersten rohen, zum Teil auf noch unsicheren Annahmen beruhenden Vorstellung vom Sternsystem erfordert eine genauere Kenntnis des Gesetzes der Sternzahlen und der Verteilung der Sterne nach ihrer absoluten Helligkeit. Für das Studium der ersten Frage wird nun in absehbarer Zeit in den photographischen Himmelsaufnahmen ein Material vorliegen, dem man eine sehr große Tragweite beilegen darf, und es ist in der Tat auch schon ein Versuch gemacht, dieses neue Material, soweit es jetzt schon erreichbar ist, auszubeuten. Charlier, der ihn ausführte, ging von der Annahme aus, daß die Verteilung der Sterne nach der scheinbaren Helligkeit dem Wahrscheinlichkeitsgesetze folge, daß also die auf die einzelnen Größenklassen fallende Sternzahl bis zu einem bestimmten in der Mitte der ganzen Reihe der scheinbaren Größen stehenden Werte wächst und dann wieder in gleicher Weise abnimmt. Die Rechnungen sind durchgeführt für neun Stellen an der Sphäre, für die die Sternzahlen nach drei Abstufungen vorlagen, nämlich für den Bereich 1. des Auges, 2. der Durchmusterungen, 3. der photographischen Himmelskarte. Wegen der Unbestimmtheit über die Helligkeitsgrenze, bis zu welcher die photographische Himmelskarte reicht, wohnt den Zahlen noch eine erhebliche Unsicherheit inne. Für die sternreichste, in der Milchstraße gelegene Gegend, die zur Untersuchung kam, fand sich, daß in einem Kegel, dessen Grundfläche $\frac{1}{48}$ des Himmels bedeckt, die Anzahl der Sterne zwischen 30 Millionen und 250 Millionen liege. Die Sternzahl wächst bis zur scheinbaren Größe 20.07 und beträgt für die Größenklasse 19.0 bis 20.0 unter der über die Grenzgröße gemachten Annahme 3730000. Für die sternärmste Gegend liegt die Gesamtzahl der Sterne im Kegel zwischen 600000 und zwei Millionen, die in der Mitte stehende scheinbare Größe ist 16.9. In ihrer Gesamtheit führen auch Charliers Untersuchungen zu der Vorstellung eines wohlbegrenzten Sternsystems, dessen Grenze in der Richtung der Milchstraße in einer dem 600- bis 1400-millionenfachen der Entfernung Erde—Sonne (10000 bis 22000 Lichtjahre) entsprechenden Entfernung liegt.

Charliers Untersuchungen.

Neuere Bearbeitungen konnten noch wesentlich erweiterte und in sich besser ausgeglichene Sternzählungen zugrundelegen. Kapteyn benutzte ein in ähnlicher Art wie das Seeligersche zusammengetragenes Material, suchte aber durch Zählung der Sterne in der Umgebung veränderlicher Sterne auf photographischen Aufnahmen die Sterne bis 16. Größe zu erfassen. Ein einheitliches Material benutzten Chapman und Melotte, die sich auf die Franklin-Adamsschen Himmelsaufnahmen stützten, und Nort, der die Harvard-Himmelskarte verarbeitete. Die Dichte der Sternverteilung ist hiernach in der Milchstraße 4.8 mal größer als an den Polen. Die Zone größter Dichtigkeit ist ein kleiner Kugelkreis, der vom Nordpole der Milchstraße $91^0\ 38'$ absteht. Das System der Sterne bis zur 11. Größe ist ein Ellipsoid mit den Achsenverhältnissen 5.6 und 8.6 parallel zur Ebene der Milchstraße und 4.5 senkrecht dazu.

Neuere Bearbeitungen.

Die neueren Forschungen haben Tatsachen zutage gefördert, die auf

den ersten Blick mit der Annahme, daß die Verteilung der Sterne auf die einzelnen Stufen der absoluten Leuchtkraft überall im Raume dieselbe sei, unverträglich zu sein scheinen. Die wichtigste dieser Tatsachen ist die, daß die Sterne von verschiedenem Spektraltypus verschieden verteilt sind in bezug auf die Milchstraße. Die Zusammendrängung der Sterne gegen die Milchstraße ist am stärksten für die Heliumsterne, die in der Milchstraße 10 mal dichter stehen als am Pole der Milchstraße. Für die Siriussterne ist das Dichteverhältnis Milchstraße zu Pol 2 : 1, für die Sterne des II. Typus, die Harvardklassen F, G, K, etwa 2 : 3 und für die rötlichen Sterne, Klasse M, 5 : 6. Die Wolf-Rayetsterne, Klasse O, finden sich bis auf einige, in den Magellanischen Wolken stehende, ausschließlich in der Milchstraße. Da man in dem Spektraltypus das Merkmal des Entwicklungszustandes der Sterne erblickt, so müßte die erwähnte Tatsache von der größten Bedeutung für den Aufbau des Sternsystems sein, wenn sie nicht durch andere Verhältnisse bedingt ist. In der Tat ist aber der Spektraltypus auch das Charakteristikum des Glühzustandes, also der absoluten Helligkeit der Sterne, und da von der absoluten Helligkeit auch die Entfernung abhängt, bis zu der die Sterne uns wahrnehmbar bleiben, die Dichtigkeit der Sternverteilung in den verschiedenen galaktischen Breiten mit der Entfernung aber verschieden abnimmt, so wird auch die scheinbare Verteilung der Sterne verschiedener absoluter Helligkeit verschieden sein können. In der Tat findet Seeliger bei Annahme gleichmäßiger Verteilung der Sterne nach absoluter Helligkeit eine hinreichende Übereinstimmung der theoretisch berechneten und der beobachteten Sternzahlen für bestimmte Spektralklassen charakterisierende Stufen der absoluten Helligkeiten. Hieraus würde also eine Schwierigkeit nicht entstehen. Einfluß des Spektraltypus.

Festgehalten ist bislang immer an dem zweiten der S. 539 aufgeführten Gesetze, daß nämlich die scheinbare Helligkeit mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Aber auch dieses Gesetz ist nicht unbestritten. Schon Olbers schloß aus dem Widerspruch der Folgerung, daß bei unendlich großer Zahl der Sterne diese den ganzen Himmel bedecken und ihn uns bei völlig ungehinderter Fortpflanzung des Lichtes überall im strahlenden Glanze der Sonne erscheinen lassen müßten, auf eine Absorption des Lichtes im Weltenraum. Die photographischen Daueraufnahmen geben durch die Tatsache, daß ausgedehnte Gebiete am Himmel sich mit leuchtender, dem Auge freilich direkt nicht wahrnehmbarer Materie bedeckt zeigen, eine Stütze für die Annahme einer wenigstens stellenweise wirkenden Absorption, die auch in dieser Beschränkung die Folgerungen aus den Abzählungen entstellen müßte. Die Wirkung einer Absorption des Lichtes würde sich darin zu erkennen geben, daß die scheinbare Helligkeit eines Sternes z. B. auf $^1/_{100}$ gesunken wäre nicht in der 10-fachen Entfernung, sondern schon in einer geringeren, sagen wir etwa der neunfachen Entfernung. Der Helligkeit nach würden also bei Vorhandensein von Absorption die Sterne bis zur Entfernung 9 den Anforderungen entsprechen, die ohne Absorption erst bei der Entfernung 10 Absorption des Lichtes.

erfüllt sein würden. Unsere Abzählungen müßten uns auf zu kleine Zahlen, auf eine zu geringe Dichtigkeit der Sternverteilung, führen, und der Unterschied würde mit der Entfernung immer mehr anwachsen. Statt der gleichförmiger Sternverteilung entsprechenden Verhältniszahl 3.981 der Sternzahlen würden wir eine kleinere erhalten. Es ist nun leicht, einen solchen Betrag der Absorption zu berechnen, daß z. B. für die dem freien Auge sichtbaren Sterne die beobachtete Verhältniszahl der unter Annahme gleichförmiger Verteilung und stattfindender Absorption berechneten gleich wird. Man würde das erreichen durch die Annahme, das Licht verlöre beim Durchlaufen einer Strecke gleich der mittleren Entfernung der Sterne erster Größe 7.3 % seiner Intensität. Dieser Betrag erweist sich aber, wenn wir zu schwächeren Sternen, also größeren Entfernungen übergehen, als viel zu groß. Wir würden zu einer mit den tatsächlichen Verhältnissen ganz unvereinbaren Beschränkung unseres Gesichtskreises gelangen.

Auf Aufnahmen des Himmels, besonders in der Milchstraßengegend, findet man häufig dunkle Stellen oder Streifen, die aussehen wie Löcher oder Unterbrechungen im Sternengrunde. Andererseits sieht man helle Sterne oft eingehüllt in einen dünnen, sehr schwach leuchtenden, oft nur photographisch feststellbaren Nebelschleier. Man gewinnt dadurch die Überzeugung, daß es im interstellaren Raume dunkle Nebelmassen gibt, die uns die dahinter stehenden Sterne verbergen oder ihr Licht schwächen. Das Vorhandensein solcher Nebelmassen ist auch herangezogen zur Erklärung der Beobachtung, daß im Spektrum bewegter Sterne zuweilen einzelne Linien, namentlich die Calciumlinie K, an der Verschiebung der übrigen Linien nicht teilnehmen, was sich dadurch erklären ließe, daß diese Linien nicht in der Sternatmosphäre, sondern in einer vor dem Stern stehenden, relativ zu ihm ruhenden Wolke entstehen. Bislang ist diese Erscheinung allerdings nur bei Sternen eines bestimmten Spektraltypus beobachtet, so daß auch eine andere Ursache vorliegen kann. Ohne Zweifel ist auch der Raum erfüllt mit großen Massen kosmischen Staubes, mit den Produkten der Ausströmungen der Kometen und den aus den Sternatmosphären ausgestoßenen gasförmigen Massen. Daher muß das von den Sternen ausgehende Licht infolge der Lichtzerstreuung eine Art „selektiver Absorption“ vortäuschen, die nach physikalischen Gesetzen sich umgekehrt mit der 4. Potenz der Wellenlänge ändert, also für die blauen Strahlen erheblich größer ist als für die roten Strahlen. Je entfernter die Sterne sind, um so mehr müßte also in ihrem Spektrum das Rot vorherrschen. In der Tat lehren die Beobachtungen, daß die Sterne von geringerer scheinbarer Helligkeit im Durchschnitt roter sind als die scheinbar helleren und daß bei Sternen gleicher scheinbarer Helligkeit und gleichen Spektrums die ferneren Sterne roter sind als die näheren. Eine Erklärung wäre gegeben durch selektive Absorption des Lichtes, aber es könnten doch auch noch zwei andere Ursachen mitwirken, nämlich ein Vorwiegen der späteren Typen, der gelben und rötlichen Sterne, unter den schwachen Sternen oder eine Abhängigkeit des

Spektrums von der absoluten Leuchtkraft. Aus der Vergleichung der Spektren stark bewegter, also naher, und schwach bewegter, ferner, Sterne gleicher scheinbarer Helligkeit schloß King auf eine Absorption von 0.00184 Größenklassen für einen Weg von einer Sternweite. Ein Stern 5. Größe würde dann in der Entfernung 10 die scheinbare Helligkeit 5.02 haben, in 100 mal größerer Entfernung würde er statt 15.0. Größe aber 16.84. Größe sein. Auch ein solcher Betrag der Absorption erscheint noch unzulässig groß, und es muß angenommen werden, daß neben der Absorption auch die beiden anderen vorhin angegebenen Ursachen wirksam sind. Neuere Untersuchungen führen auch auf eine Absorption von nur $^1/_{10}$ des eben angenommenen Betrages. Es würde dann erst in 1000 Sternweiten eine Schwächung um 0.2 Größenklassen eintreten; die an der äußersten Grenze des Milchstraßenringes, wie Seeliger ihn bestimmte, stehenden Sterne würden nur um eine Größenklasse geschwächt werden. Aber auch in dieser Größe würde die Wirkung hinreichend sein, um zu verhindern, daß durch das Licht von einem anderen Sternsystem Kunde zu uns gelangte. Auch daraus, daß der Farbenindex bei den Sternen der kugelförmigen Sternhaufen, deren Entfernung nach Zehntausenden von Sternweiten zu berechnen ist, dasselbe Verhalten zeigt, daß also in diesen fernen Sternsystemen das Zahlenverhältnis der blauen und roten Sterne das gleiche ist wie bei den Sternen in unserer Nähe, ist auf eine verschwindende Extinktion zu schließen. Bei merklicher Extinktion müßten hier Werte des Farbenindex auftreten, die um mehrere Größenklassen größer wären als die normalen Werte, die roten Sterne also stark überwiegen. Die von Shapley bei den kugelförmigen Sternhaufen gefundenen tatsächlichen Verhältnisse erscheinen nur vereinbar mit einer Extinktion des Lichtes von weniger als 0.00001^m für eine Sternweite. Das aus einer Entfernung von 1000 Sternweiten, nach einer Lichtzeit von 3258 Jahren zu uns gelangende Licht hätte noch nicht 1% an Intensität eingebüßt.

VI. Die Bewegungen. Newtons Entdeckung der allgemeinen Gravitation gab den Anstoß zu einer grundsätzlichen Änderung unseres Standpunktes gegenüber dem Universum. Das Prinzip der Unveränderlichkeit, als dessen Verkörperung von alters her der sternenbesäte Himmel gelten durfte, war unhaltbar geworden. Wo Gravitation, da ist auch Bewegung. Erblicken wir in jedem der zahllosen Sterne des Firmamentes den Sitz einer anziehenden Kraft, deren Wirkung sich auch auf die Sonne erstreckt, so scheint jeder feste Boden zu schwinden, es scheint unmöglich, das Spiel der unermeßlich großen Zahl der auf die Sonne wirkenden Kräfte zu überschauen und das schließliche Resultat ihrer vereinten Wirkung, die resultierende Bewegung der Sonne, auch nur für einen Moment vorauszusehen. In der Tat würde es einen Ausweg aus der Schwierigkeit kaum geben, wenn nicht der großen Zahl der aufeinander wirkenden Massen ihre ungeheuren gegenseitigen Entfernungen gegenüberständen. Diese bewirken, daß uns die kosmischen Bewegungen der Sterne unter so außerordentlich kleinem Größenordnung der Eigenbewegungen.

Winkel erscheinen, daß sie überhaupt erst nach Ablauf längerer Zeiträume erkennbar werden. Halley war der erste, der sie bei der Vergleichung seiner Breitenbestimmungen mit denen des Altertums, wie sie von Ptolemäus überliefert waren, bei mehreren Sternen wahrnahm; den so sehr verfeinerten Hilfsmitteln der Neuzeit sind sie oft schon im Zeitraum einiger Jahre zugänglich. Jedenfalls aber folgt aus der Beobachtung, daß die resultierenden Bewegungen verschwindend klein sind gegenüber den Entfernungen der Sterne und daß wir berechtigt sind, sie innerhalb des von uns zu überblickenden Zeitraums von zwei Jahrtausenden als gleichförmig und geradlinig zu betrachten, und ihre etwaigen Gesetze zu ergründen versuchen dürfen, ohne uns vor der Hand über ihre Entstehung Rechenschaft zu geben.

Deutung der Eigenbewegungen.

Drei Möglichkeiten konnten vorliegen: entweder die Bewegung der Sonne ist klein und das, was wir beobachten, ist eine Bewegung der Fixsterne selbst, oder das andere Extrem: eine weit überwiegende in den Beobachtungen fast ausschließlich zur Geltung kommende Bewegung der Sonne, so daß sich also die Bewegung der Sterne hauptsächlich aus ihrer säkularen Parallaxe (S. 520) erklären würde, oder die dritte Möglichkeit: Sonnenbewegung und Spezialbewegung der Sterne von gleicher Größenordnung. Der zweite Fall, die reine parallaktische Bewegung, bietet sich am leichtesten der Erklärung dar. Eilen wir mit großer Geschwindigkeit durch einen Wald, so scheinen die vor uns in der Richtung unserer Bewegung stehenden Bäume auseinanderzurücken, sich von dem Zielpunkte unserer eigenen Bewegung fortzubewegen, und umgekehrt die hinter uns liegenden Bäume scheinen sich alle auf den Punkt, auf den unsere eigene Bewegung rückwärts verlängert trifft, hin zu bewegen. Die scheinbaren Bewegungen der Sterne müßten also im Fall 2 sämtlich vom Zielpunkte der Sonnenbewegung, dem „Apex", ausgehen, sie müßten im gegenüberliegenden Punkte der Sphäre, dem „Antiapex", wieder zusammenlaufen. Ganz die gleiche Erscheinung würde freilich auch im Falle 1 eintreten, wenn die Sternbewegungen in der gleichen Richtung untereinander parallel erfolgen. Der Anblick würde ähnlich sein dem einer aus sehr großer Entfernung auf uns zu kommenden und an uns vorübereilenden Reiterschar. Von einem Punkte ausgehend, würden die einzelnen Reiter immer weiter auseinanderrücken, bis sie uns erreicht haben, um dann wieder gegen einen Punkt sich zusammenzudrängen. Die Bedeutung der beiden Strahlungspunkte wäre aber die entgegengesetzte wie vorhin. Der Zielpunkt der Bewegungen wäre der Zielpunkt der Richtung der gemeinsamen Bewegung der Sterne, wir nennen ihn den Vertex, der Ausgangspunkt wäre der Antivertex.

W. Herschels Apexbestimmung.

Überlegungen dieser Art bildeten den Stützpunkt, von dem aus W. Herschel gegen Ende des 18. Jahrhunderts das Problem angriff, und sie haben ihn schon zu einer im wesentlichen richtigen Lösung der Frage der Sonnenbewegung geführt, obwohl in Wirklichkeit nicht die oben unter 1 und 2 dargelegten einfachen Verhältnisse, sondern vielmehr der dritte Fall gleicher Größenordnung der Bewegung der Sonne und der Spezialbewegungen der

Sterne vorlag, so daß die beobachteten Bewegungen, die aus diesen beiden Komponenten als Resultierende entstehen, im allgemeinen nicht auf den Antiapex gerichtet sind. Während die parallaktischen Bewegungen rückwärts verlängert sich sämtlich im Apex schneiden würden, werden die Eigenbewegungen an demselben je nach der Größe der Spezialbewegungen im Verhältnis zur parallaktischen Bewegung mehr oder weniger weit vorübergehen. Immerhin werden aber die Schnittpunkte solcher Bewegungen, bei denen die Spezialbewegung klein ist gegenüber der parallaktischen Bewegung, in der Nähe des Apex liegen. Eine wirkliche Bestimmung der Lage des Apex aus den Schnittpunkten der Eigenbewegung ist indes nur möglich auf Grund einer bestimmten Hypothese über das Verhalten der Spezialbewegungen. Eine allen Sternen gemeinsame Bewegung und eine davon verschiedene Sonnenbewegung würde zu Eigenbewegungen führen, die sich wieder sämtlich in einem Punkte schneiden müßten. Dieser Punkt wäre weder der Antiapex noch der Vertex, sondern ein auf dem größten diese beiden Punkte verbindenden Kreise liegender Punkt, der vom Antiapex um so mehr abstehen würde, je größer die gemeinsame Bewegung der Sterne im Verhältnis zur Sonnenbewegung ist. Das Material, das Herschel zur Verfügung stand, ließ einen solchen gemeinsamen Schnittpunkt der Bewegungen nicht erkennen, wohl aber eine Anhäufung von Schnittpunkten je zweier Bewegungen in einer bestimmten Gegend an der Sphäre. Unter der hiernach vorläufig gerechtfertigt erscheinenden Annahme, daß in den Spezialbewegungen der Sterne eine bestimmte Gesetzmäßigkeit nicht walte, daß sie regellos seien nach Größe und Richtung, und daß sie demnach die Eigenbewegungen wie zufällige Fehler beeinflußten, bestimmte er jenen Punkt der Sphäre, der die Gesamtheit der eingezeichneten Bewegungen möglichst gut darstellte, indem er den einzelnen Bewegungen so nahe wie möglich lag. Diesen Punkt, der nahe bei η Herculis liegt, betrachtete Herschel als den Zielpunkt, den Apex, der Sonnenbewegung. Die Herschelsche, auf der Voraussetzung der Regellosigkeit der Spezialbewegungen beruhende Methode ist von einer ganzen Reihe von Forschern zur Bestimmung der Sonnenbewegung angewandt worden, nachdem Argelander sie in eine für die Behandlung einer großen Zahl von Sternen, wobei Herschels konstruktive Lösung nicht mehr durchführbar war, geeignete Form gebracht hatte. Er ging dabei aus von einer als genähert richtig betrachteten Lage des Apex, berechnete die Abstände desselben von den einzelnen Richtungen und die Abhängigkeit dieser Abstände von Änderungen der Koordinaten des Apex und bestimmte dann solche Werte dieser Änderungen, die die Summe der Quadrate der Abstände so klein wie möglich machten. Eine andere von Airy stammende Methode der Rechnung besteht darin, daß man die parallaktischen Bewegungen in den beiden Koordinaten darstellt als Funktion der rechtwinkligen Komponenten der Sonnenbewegung, ausgedrückt in Teilen der als konstant betrachteten Entfernung der Sterne, und nun jene Werte der Komponenten der Sonnenbewegung bestimmt, die die

Argelander.

Airy.

beobachteten Bewegungen möglichst gut darstellen. Man erhält durch diese Methode die Richtung und auch den linearen, in Einheiten der mittleren Entfernung der bei der Rechnung benutzten Sterne ausgedrückten Betrag der Sonnenbewegung.

Die Resultate, die nach diesen beiden Methoden sich ergaben, zeigten nun eine dem Charakter der in Frage kommenden Verhältnisse nach als ziemlich befriedigend zu betrachtende Übereinstimmung. Sie gruppierten sich um einen Punkt mit etwa den Koordinaten $\alpha = 267^0$, $\delta = +30^0$. Von den neueren in dieser Richtung liegenden Resultaten sei noch das von L. Boss aus seinem 1910 publizierten Kataloge abgeleitete angeführt. Der Katalog enthält 6188 über den ganzen Himmel verteilte hellere Sterne, für die meistens genaue Positionen aus früherer Zeit vorlagen, sodaß eine zuverlässige Bestimmung der Eigenbewegung erwartet werden durfte. Boss fand als Koordinaten des Zielpunktes der Sonnenbewegung $\alpha = 270^0.5$, $\delta = +34^0.3$, geltend für 1875.0.

Die Positionen der Sterne beziehen sich, wie früher erwähnt, auf ein rechtwinkliges Achsensystem, dessen Grundebene der Äquator ist und dessen eine Achse auf den Frühlingspunkt zielt. Aus der Gestalt der Erde und der auf sie durch die anderen Massen ausgeübten Anziehung ergab sich eine Präzession. Bewegung dieses Systems, die Präzession. Daher sind die Bestimmungen der Eigenbewegungen und der Sonnenbewegung untrennbar verknüpft mit der Aufgabe der Bestimmung der Präzessionskonstante, deren Verbesserung gleichfalls in die Bedingungsgleichungen für eine möglichst nahe Darstellung der beobachteten Eigenbewegungen aufzunehmen ist. Die schließlich angenommene Sonnenbewegung bezieht sich also auf ein Achsensystem, dessen Bewegung derjenigen der Gesamtheit der benutzten Sterne folgt. Anfangs waren das nur die helleren Sterne, nach und nach erstreckten die Beobachtungen sich auf immer schwächere Sterne, und da deren Zahl ja verhältnismäßig immer mehr überwiegt, je mehr das benutzte Material anwächst, geben die lichtschwachen sehr entfernten Sterne, bei denen die Wirkung der Sonnenbewegung sehr klein ist, immer mehr den Ausschlag. Zwischen den aus den helleren und den aus den schwachen Sternen abgeleiteten Resultaten für den Ort des Apex besteht nun keine volle Übereinstimmung. Die Deklination des Apex wird um so größer gefunden, je schwächer die zur Rechnung benutzten Sterne sind. Der Grund läßt sich, da das Material für die schwachen Sterne noch zu lückenhaft ist, noch nicht angeben. Ein Versuch Comstocks, aus sehr schwachen Sternen, deren Eigenbewegung er, Arbeiten O. Struves und Winneckes fortführend, durch Anschluß an nahe helle Sterne bekannter Eigenbewegung bestimmte, einen für Sterne der mittleren Helligkeit 11^m geltenden Zielpunkt abzuleiten, scheiterte an systematischen Fehlern der Beobachtungen. Das von Wolf mit Hilfe des Stereokomparators gesammelte Material (vgl. S. 516) umfaßt schwache Sterne von größerer Eigenbewegung; es beschränkt sich also wesentlich auf Sterne von geringer Masse in der Nachbarschaft der Sonne. Eine Bearbeitung der an

Schwache Sterne.

23 ziemlich gleichmäßig über den nördlichen Himmel verteilten Stellen gefundenen Eigenbewegungen durch Wirtz und Hügeler ergab einen Zielpunkt in $\alpha = 294^0$, $\delta = +32^0$, also eine Verschiebung um 20^0 in der Richtung der Rektaszension. Für den Südhimmel fand Wirtz aus einem gleichfalls durch Vergleichung photographischer, 16 bis 17 Jahre auseinander liegender Aufnahmen gewonnenen Material als Koordinaten des Apex aus Sternen 8. bis 13. Größe $\alpha = 278^0$, $\delta = +41^0$. Die Lage des Zielpunktes scheint auch durch den Spektralcharakter beeinflußt zu werden. Die Sterne der späteren Typen G, K, M ergeben einen um etwa 10^0 in Deklination nördlicher liegenden Zielpunkt als die Sterne der früheren Typen. Der innere Zusammenhang dieser Verschiebungen des Apex bedarf noch der Aufklärung.

Alle nach diesen Methoden bestimmten Positionen des Zielpunktes der Sonnenbewegung haben das wesentliche Merkmal, daß sie längs des Nordrandes der Milchstraße über einen Raum von etwa 30^0 Längsausdehnung verteilt liegen. Nur der Zielpunkt der Wolfschen Sterne liegt ganz nahe der Mitte der Milchstraße. Die Bewegung des Sonnensystems erfolgt also in der Ebene der Milchstraße, über die Richtung besteht aber noch eine Unsicherheit im Betrage von etwa 10^0.

Der wesentliche Unterschied der Argelanderschen und der Airyschen Behandlung des Problems der Sonnenbewegung ist der, daß jener nur die Richtungen der Bewegungen, nicht ihre Größe mitsprechen läßt, also die durch die Beobachtungen gelieferten Daten nicht voll ausnutzt, während dieser, um die scheinbaren Bewegungen auch ihrer Größe nach darzustellen, die Kenntnis der Entfernung der einzelnen Sterne braucht, was nur auf dem Wege über unsichere Hypothesen erreichbar ist. Wenn die Übereinstimmung der Resultate beider Wege nun auch die hieraus sich ergebenden Bedenken zu zerstreuen scheint, so muß doch die so erlangte Bestimmung der Größe der Sonnenbewegung immer noch von zweifelhaftem Werte sein. Das Spektroskop in Verbindung mit der Photographie gab uns nun aber ein weiteres wichtiges Hilfsmittel zur Lösung der Frage in den Radialbewegungen, den Bewegungen von uns weg oder auf uns zu. Da diese Bewegungen direkt ausgedrückt in einer irdischen Einheit, etwa Kilometern, erhalten werden, so fällt aus ihrer Darstellung durch die Hypothese einer Sonnenbewegung die Entfernung ganz heraus. Nehmen wir eine auf einen bestimmten Punkt gerichtete Sonnenbewegung von bestimmter Größe an, projizieren dieselbe auf die Visionsrichtung nach einem gegebenen Sterne, so sollte der erhaltene Betrag mit der Radialbewegung dieses Sternes übereinstimmen, falls Spezialbewegungen nicht vorhanden wären. Betrachten wir diese wieder als regellos, so bestimmt die möglichst gute Darstellung der beobachteten Radialbewegungen wieder Richtung und Größe der Sonnenbewegung, letztere jetzt aber gänzlich unabhängig von Hypothesen über die Sternentfernungen. Das zuverlässigste in dieser Richtung jetzt vorliegende Resultat stammt von W. W. Campbell und beruht auf 1180 Sternen und 13 gleichfalls beobachteten Nebeln beider

Radialbewegungen.

Campbells Bestimmung.

Hemisphären. Für den Zielpunkt der Sonnenbewegung findet Campbell $\alpha = 268^0.5$, $\delta = +25^0.3$ und für die Größe der Bewegung 19.5 km in der Sekunde. Die Sonnenbewegung ist hiernach eine Größe gleicher Ordnung wie die Bewegungen der Planeten in unserem Sonnensystem: Die Erde legt auf ihrer Bahn um die Sonne in der Sekunde einen Weg von 30 km, Merkur einen solchen von 48 km, Neptun von 5 km zurück.

Frei von jeder Hypothese können wir die Bewegung eines Sternes relativ zur Sonne berechnen, wenn wir seine Parallaxe, seine seitliche Eigenbewegung und seine Radialbewegung kennen. Wir berechnen dann mit Hilfe der Parallaxe den linearen Betrag der senkrecht zur Gesichtslinie liegenden Komponente der Bewegung, verbinden diese mit der in die Gesichtslinie fallenden Komponente und erhalten als Resultante beider die totale relative Bewegung nach Größe und Richtung. Wegen der Schwierigkeit der Parallaxenbestimmung kann dieser Weg nur für die nähere Umgebung der Sonne zur Ausführung kommen, er wird uns mit der Zeit aber für diesen begrenzten Bereich die lückenlose Kenntnis der Anordnung und der Bewegung der einzelnen Massen verschaffen. Gyllenberg fand nach dieser Methode, daß relativ zu der Gesamtheit der 144 Sterne, die der Rechnung zugrunde lagen, die Sonne sich mit 20.0 km in der Sekunde Geschwindigkeit auf den Punkt $\alpha = 277^0.1$, $\delta = +34^0.0$ bewegt.

Totale Bewegungen.

Spezialbewegungen.

Hiernach konnte man die Richtung der Sonnenbewegung als mit hinreichender Sicherheit festgestellt betrachten und war imstande, die beobachteten Eigenbewegungen in zwei Teile, eine auf den Antiapex gerichtete Komponente und die dazu senkrechte, durch die Spezialbewegungen erzeugte Komponente zu zerlegen. Das Studium dieser zweiten Komponente mußte zeigen, ob die Voraussetzung der Regellosigkeit dieser Spezialbewegungen erlaubt sei, oder ob zwischen diesen Bewegungen Gezetze beständen, die einen physischen Zusammenhang von Sterngruppen zu besonderen Systemen oder eine Gesamtbewegung des Sternsystems wahrscheinlich machten. Für einzelne Sterngruppen, so die Plejaden, die Hyaden, die hellen Sterne im Großen Bären, macht der bloße Anblick schon eine engere Zusammengehörigkeit wahrscheinlich, und die Parallelität der Eigenbewegung oder die Gleichheit der Radialbewegungen, wie im Falle der hellen Sterne des Orion, trat hier als weiteres Beweismittel hinzu; bei anderen Gruppen, den sogenannten star-drifts, auf die zuerst von Proctor hingewiesen wurde und von denen die im Stier, die im Perseus, die 61 Cygni-Gruppe und die die Bärensterne selbst mit umfassende Ursa major-Gruppe als die wichtigsten hervorgehoben seien, sprach nur die Gleichheit der Bewegungen für eine solche Zusammengehörigkeit und demnach gegen die Annahme der Regellosigkeit der Spezialbewegungen. Andererseits legt das Vorhandensein der Milchstraße und der offenbar gesetzmäßigen Anordnung der Sterne gegenüber dieser Grundebene den Gedanken nahe, daß die Bewegungen der Fixsterne in Beziehung zu dieser Ebene ständen. Eine Prüfung dieser Annahme führte Schönfeld aus, indem er versuchte,

Sternscharen.

die Bewegungen darzustellen als Gesamtergebnis einer fortschreitenden Bewegung der Sonne und einer Rotation des ganzen Sternsystems um eine zur Ebene der Milchstraße senkrechte Achse. Die Hypothese führte aber nicht zu einer genügenden Erklärung der Spezialbewegungen.

Es war also erforderlich, auf ein genaueres Studium der Spezialbewegungen einzugehen. Eine notwendige Folgerung aus der Voraussetzung der Regellosigkeit der Spezialbewegungen ist die, daß eine Abweichung nach der linken Seite von der Richtung auf den Antiapex genau ebenso wahrscheinlich sein muß wie eine Abweichung nach der rechten Seite. Bezeichnen wir die erstere Abweichung als positiv, die andere als negativ, so müßte die Anzahl der positiven und der negativen Abweichungen gleich sein. Das ist aber nicht der Fall, vielmehr stellte sich zuerst bei einer Untersuchung der Bewegungen im neuen Auwersschen Kataloge der Bradleyschen Sterne ein erhebliches Überwiegen der positiven Abweichungen heraus, wenn man den Zielpunkt der Sonnenbewegung wie oben annahm. Man kann nun die Richtung einer Bewegung an der Sphäre in einfachster Weise dadurch festlegen, daß man den Pol des größten Kreises bestimmt, auf dem die Bewegung erfolgt. Für alle Bewegungen, die auf einen Punkt der Sphäre gerichtet sind, also für alle größten Kreise, die sich in diesem einen Punkte und dem ihm gegenüberliegenden an der Sphäre durchschneiden, werden diese Pole selbst wieder auf einem größten Kreise liegen, der vom Zielpunkte der Bewegungen 90^0 absteht. Hiernach müßten die Pole der parallaktischen Bewegung der Sterne auf einem größten Kreise liegen, der vom Zielpunkte der Sonnenbewegung 90^0 absteht. Wir nennen ihn den parallaktischen Äquator. Die Pole der Eigenbewegungen, in denen die parallaktische Bewegung sich mit der Spezialbewegung zusammengesetzt hat, würden dadurch aus dem parallaktischen Äquator herausgerückt sein, dieser würde aber bei regelloser Verteilung der Spezialbewegungen die Mittellinie der Zone bleiben, über die die Pole verteilt sind. Eine nach diesen schon von Bessel angegebenen Prinzipien von Kobold ausgeführte Untersuchung ergab nun, daß ein parallaktischer Aquator allerdings vorhanden ist, daß er aber nicht den oben erhaltenen Koordinaten des Zielpunktes der Sonnenbewegung entspreche, sondern eine gemeinsame Bewegung der Sterne auf einen Punkt in $\alpha = 266^0.5$, $\delta = +3^0.5$ andeute. Vergleicht man die Richtungen der Bewegungen mit der Richtung auf diesen Punkt hin, so ergibt sich eine nahe Gleichheit der Anzahlen der positiven und negativen Abweichungen, also die Erfüllung der Forderung, von der wir ausgingen, zugleich aber noch eine andere Tatsache. Wäre nur die Sonnenbewegung vorhanden, so müßten alle Bewegungen auf den Antiapex gerichtet sein; die Spezialbewegungen ändern die Richtung, es könnte aber eine Bewegung auf den dem Antiapex gegenüberliegenden Punkt, den Apex, nur entstehen bei Sternen, die eine der Sonnenbewegung genau parallel erfolgende, sie an Größe übertreffende Bewegung besitzen. Es ergab sich nun in der Tat, daß neben den auf den vorhin angegebenen

Kobold-Untersuchungen.

Punkt gerichteten Bewegungen eine erhebliche Zahl von Bewegungen vorhanden sei, die auf den gegenüberliegenden Punkt gerichtet waren, und das führte Kobold zu der Annahme, die Sonne bewege sich mit den Sternen ihrer Umgebung in derselben Richtung, aber mit verschiedener Geschwindigkeit, hinter der Mehrzahl zurückbleibend, aber eine beträchtliche Zahl doch auch überholend.

Durch diese Untersuchungen war die Annahme der Regellosigkeit der Spezialbewegungen unhaltbar geworden, und es war damit der Anstoß gegeben, daß auch andere Forscher nach einer von dieser Annahme freien Darstellung der beobachteten Bewegungen suchten. Einen ersten erfolgreichen Versuch auf graphischem Wege machte Kapteyn, indem er den Himmel in 28 Felder einteilte und in jedem dieser Felder ein graphisches Bild der Verteilung der Bewegungsrichtungen in bezug auf die Richtung nach dem in $\alpha = 275^0$, $\delta = +30^0$ angenommenen Apex konstruierte. Er fand dabei, daß diese Verteilung durchaus nicht symmetrisch in bezug auf die Richtung nach dem Apex sei, wie zu fordern war, wenn die systematischen Bewegungen gesetzlos wären. In allen einzelnen Feldern traten zwei Vorzugsrichtungen der Bewegungen auf, sie fallen aber in den verschiedenen Feldern auf verschiedene Richtungen. Verlängert man diese Richtungen vom Mittelpunkte der Fläche, für die sie gelten, aus, so schneiden sie sich in zwei Punkten der Sphäre, natürlich nicht streng, sondern nur genähert. Hieraus folgt, daß die scheinbaren Bewegungen der Sterne in zwei Vorzugsrichtungen erfolgen, daß zwei Sternschwärme vorhanden sind, deren einer sich relativ zur Sonne auf einem Punkt 7^0 nördlich von α Orionis zu bewegt, während der andere auf einen Punkt 2^0 südlich von η Sagittarii gerichtet ist. Die beiden Punkte liegen in der Milchstraße, aber nicht genau gegenüber, sondern in einem Abstande von 140^0. Es handelt sich nun um die Erklärung dieser Tatsache. Die einfachste Annahme wäre die, daß wir unsere Sonne als ruhend betrachteten und zwei sich in den beiden bezeichneten Richtungen bewegende Sternschwärme voraussetzten. Wir würden damit der Sonne aber eine bevorzugte Stellung einräumen, und deshalb scheint diese Annahme unberechtigt. Wahrscheinlicher ist die Annahme, daß der Gesamtheit der Sterne eine Bewegung in einer bestimmten Richtung innewohne und daß die Sonne eine davon verschiedene Bewegung habe. Die beiden Richtungen wären dann die scheinbaren Bewegungsrichtungen, die als Resultante der Sonnenbewegung und der beiden entgegengesetzten Richtungen der Sternbewegungen sich ergeben. Nehmen wir die Richtung der Sonnenbewegung als durch die älteren Methoden bestimmt an, so würden wir (Fig. 36) aus den drei Richtungen SV_1, SV_2 und SA, die alle drei in der Ebene der Milchstraße liegen, die Richtung der absoluten Sternbewegungen bestimmen können, sobald wir über das Verhältnis der Größe der Bewegungen, etwa durch die beobachteten Radialgeschwindigkeiten, eine Kenntnis hätten.

Kapteyns Zweischwarmhypothese.

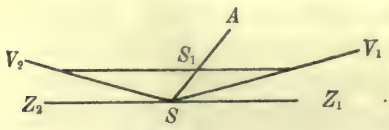


Fig. 36.

Wir können uns aber unter der durch die Beobachtung gerechtfertigten Annahme, daß die Zahl der Sterne beider Schwärme gleich sei, auch auf den Standpunkt eines ruhenden Beobachters dadurch stellen, daß wir den Sternen gleichgroße Bewegungen in den beiden diametralen Richtungen erteilen, also auf SV_1 und SV_2 gleiche Stücke abschneiden. Dann ergibt sich durch Z_1Z_2 die Richtung der Bewegung der Sterne und durch SS_1 die Sonnenbewegung. Nach Kapteyn zielt die Richtung Z_1Z_2 auf den Punkt $\alpha = 271^0$, $\delta = -13^0$. Nach den Beobachtungen wäre anzunehmen, daß die Verteilung der Sterne auf die beiden Ströme überall am Himmel etwa die gleiche sei. Die beiden Ströme scheinen sich auch nicht durch die Sternhelligkeiten oder durch das Spektrum oder durch die Größe der mittleren Bewegung zu unterscheiden.

Eddingtons Theorie.

Diese Zweischwarmtheorie ist von Eddington weiter ausgebaut und der strengeren Rechnung zugänglich gemacht. Wenn bei den über eine bestimmte Fläche am Himmel verteilten Sternen sich eine allen Sternen gemeinsame Bewegung verbindet mit einer den einzelnen Sternen eigentümlichen, gesetzlos erfolgenden Bewegung, so entspricht der entstehenden Verteilung der Bewegungen ein ganz bestimmtes Bild. Tragen wir die Bewegungen von einem Punkte aus in der ihnen zukommenden Richtung ab und verbinden die Endpunkte dieser Radien, so entsteht eine Ellipse, deren Lage durch die Richtung der gemeinsamen Bewegung und deren Gestalt durch das Verhältnis der Größen der gemeinsamen und der mittleren eigentümlichen Bewegung bestimmt ist. Sind in den Bewegungen zwei Vorzugsrichtungen wirksam, so entspricht der Verteilung der Bewegungen eine durch die Überlagerung zweier solcher Ellipsen entstehende Figur, und wir müssen durch Drehung zweier Ellipsen gegeneinander und durch Änderung ihrer Elliptizitäten in der Lage sein, ein der tatsächlich beobachteten Verteilung entsprechendes Bild zu konstruieren und so die beiden Vorzugsrichtungen und die Größe der mittleren Spezialbewegung und die der gemeinsamen Strombewegung im Verhältnis zur Sonnenbewegung bestimmen können.

Die Vorstellung zweier einander so völlig gleicher, sich durchdringender Sternströme läßt sich vielleicht schwer mit mancherlei Tatsachen vereinigen. Vor allen Dingen spricht die sicher nachgewiesene gesetzmäßige Verteilung der Sterne in bezug auf die Milchstraße, welche für die Einheitlichkeit des Sternsystems zeugt, gegen dieselbe. Trotz der guten Darstellung der beobachteten Tatsachen, die diese Hypothese ergibt, wird man doch lieber an der einfacheren und natürlicheren Vorstellung nur einer gemeinsamen Bewegung der Gesamtheit der Sterne neben der Sonnenbewegung festhalten.

Schwarzschilds Hypothese.

Eine auf dieser Grundlage aufgebaute Hypothese hat Schwarzschild ausgestaltet. An die Stelle der alten Hypothese der Regellosigkeit der Spezialbewegungen der Sterne setzt er die Annahme, daß diese Bewegungen eine bestimmte Richtung bevorzugen, daß aber die zu dieser Vorzugsrichtung senkrechte Komponente der Bewegungen den Charakter zufälliger Fehler habe, also keine Richtung bevorzuge und meist von geringer Größe sei.

Tritt zu den so charakterisierten Spezialbewegungen der Sterne nun die durch die Sonnenbewegung erzeugte parallaktische Komponente hinzu, so lassen sich die beiden ausgezeichneten Richtungen, nämlich die nach dem Antiapex und die nach dem Vertex, die Vorzugsrichtung der Spezialbewegungen, dadurch erkennen, daß in bezug auf die Richtung nach dem Antiapex die Bewegungen symmetrisch verteilt sein müssen, d. h. eine gleiche Anzahl auf beiden Seiten dieser Richtung liegen muß, während in bezug auf die Richtung zum Vertex die Bedingung erfüllt sein muß, daß auf jeder Seite dieser Richtung das Verhältnis der dem Vertex zugewandten und der abgewandten, nach der Seite des Antivertex liegenden Bewegungen das gleiche sein muß. Ordnen wir die Richtungen nach dem Winkel, den sie mit der Vorzugsrichtung bilden, und zählen die in die vier Quadranten fallenden Richtungen, so ist, wenn n_1, n_2, n_3, n_4 die erhaltenen Zahlen sind, für die Richtung nach dem Antiapex $n_1 + n_3 = n_2 + n_4$ und für die Richtung nach dem Vertex $n_1 : n_2 = n_4 : n_3$. Verschiedene Berechnungen nach dieser Hypothese führten im Mittel auf die Werte: Apex $\alpha = 269^0$, $\delta = +32^0$, Vertex $\alpha = 93^0$, $\delta = +8^0$. Die mittlere Geschwindigkeit der Bewegung in der Richtung nach dem Vertex ergibt sich zu 28 km. Eine Untersuchung der Radialbewegungen ließ auch in diesen die beiden Vorzugsrichtungen erkennen, aber nicht so deutlich, wie zu erwarten war. Der Grund davon lag aber nicht in einem Versagen der Hypothese oder in einem anderen Verhalten dieser Bewegungen als vielmehr darin, daß bei den ersten Anwendungen die Auswahl der der Bestimmung der Radialbewegungen zugänglichen Sterne auf die helleren Sterne beschränkt war, wodurch besondere Verhältnisse bedingt sind, wie wir noch sehen werden.

Dreischwarmhypothese.

Geben diese Hypothesen nun auch die charakteristischen Züge der beobachteten Sternbewegungen wieder, so können wir uns mit ihrer Hilfe doch noch kein Bild von den Ursachen und dem Zusammenhange der Bewegungen machen, und es bedarf noch des tieferen Eindringens in die Einzelheiten, um das Bild zu vervollständigen. Einzelne solche Züge haben die Forschungen der jüngsten Zeit schon zutage gefördert. So wurden Hough und Halm durch Gegenüberstellung der berechneten relativen Bewegung aus den Sternen nördlich von der Milchstraße und den südlich von derselben zu der Erkenntnis geführt, daß der eine der beiden scheinbaren Sternströme sich über den ganzen Himmel gleichförmig verhält, während der andere auf beiden Hemisphären verschieden auftritt. Sie fanden eine Erklärung in der Annahme eines dritten Sternstromes oder vielmehr Sternschwarmes, der von den beiden anderen dadurch ausgezeichnet ist, daß er relativ zu ihnen in Ruhe ist. Zu diesem dritten Sternschwarme gehörten besonders die Orionsterne, die sich in der Tat den anderen beiden Strömen nicht leicht einordnen ließen.

Verhalten der verschiedenen Spektralklassen.

Ein ganz neuer Zug kam aber durch die Diskussion der Spezialbewegungen der Sterne in bezug auf ihren Spektralcharakter zutage. Man machte zuerst die Wahrnehmung, daß die Sterne vom Heliumtypus sich durch außergewöhnlich kleine Bewegungen, sowohl im Visionsradius wie senkrecht da-

zu, auszeichnen und an der Zweischwarmbewegung nicht teilnehmen. Die Heliumsterne zeigen, wie früher schon erwähnt, eine starke Zusammendrängung in der Milchstraße. Die kleine Bewegung senkrecht zur Gesichtslinie bei beträchtlicher scheinbarer Helligkeit läßt auf eine große Entfernung und auf eine große absolute Helligkeit dieser Sterne schließen. Es sind Sterne im höchsten Glutzustande in den äußersten Regionen des Sternsystems, deren intensives Licht aber doch bis zu uns dringt. Bei den Radialgeschwindigkeiten, bei denen die Entfernung keine Rolle spielt, ist man ohne eine Hypothese in der Lage dadurch, daß man die beobachteten Bewegungen vom Einflusse der bekannten Sonnenbewegung befreit, den dem Sterne selbst anhaftenden Teil der Bewegung zu berechnen. Bei den seitlichen Eigenbewegungen erreicht man das gleiche Ziel auf einem Umwege. Man zerlegt die beobachteten Eigenbewegungen in eine nach dem Antiapex gerichtete und eine dazu senkrechte Komponente. Unter der Voraussetzung, daß die Spezialbewegungen der Sterne nach allen Richtungen gleich wahrscheinlich und durchschnittlich von gleicher Größe sind, verschwindet für die Sterne eines bestimmten, nicht zu ausgedehnten Areals am Himmel im Mittel der in die Richtung nach dem Antiapex fallenden Komponenten der Einfluß der Spezialbewegungen. Wir können den so bestimmten Mittelwert als das Spiegelbild der Sonnenbewegung für den Mittelpunkt des betreffenden Himmelsareals betrachten und nach dem einfachen Gesetze, nach dem die Größe dieses Spiegelbildes vom Werte null im Apex und Antiapex bis zu seinem Maximalwerte in 90^0 Abstand vom Apex und Antiapex wächst, diesen Maximalwert, d. h. den Winkel, unter welchem die Sonnenbewegung aus der mittleren Entfernung der Sterne, senkrecht gesehen, erscheint, berechnen. Unter der gleichen Voraussetzung ist aber das Mittel der anderen Komponenten, wenn wir es, ohne Rücksicht darauf, ob die Bewegung nach rechts oder nach links von der parallaktischen Sonnenbewegung fällt, bilden, die mittlere Spezialbewegung der Sterne in der Richtung senkrecht zur parallaktischen Bewegung von uns aus gesehen. Im Verhältnis der Werte der beiden Komponenten haben wir auch das Verhältnis der Sonnenbewegung zur Sternbewegung, beide in Bogenmaß ausgedrückt. Da wir die Sonnenbewegung auch in linearem Maße kennen, erfahren wir durch Multiplikation mit dieser Verhältniszahl auch die Größe der Sternbewegung in linearem Maße, geltend für die bestimmte Richtung senkrecht zur parallaktischen Bewegung. Aus der mittleren Radialbewegung sowohl, als auch aus der so berechneten mittleren Bewegungskomponente senkrecht zur Apexrichtung können wir aber ferner auch die wahre totale mittlere Bewegung der Sterne berechnen, da nach einem zuerst von Kleiber bewiesenen Satze der Mittelwert jeder dieser Komponenten gleich der Hälfte der mittleren totalen Bewegung ist. Die erhaltenen Zahlen sind in folgender Tabelle zusammengestellt (S. 556).

Die Vergleichung der beiden in Spalte 5 angegebenen Werte der linearen und der in Bogenmaß ausgedrückten, zur Apexrichtung senkrechten

Typus Vogel	Typus Pickering	Mittlere Bewegung im Visionsradius (Campbell)	Mittlere Bewegung parallaktische (L. Boss)	Mittlere Bewegung senkrecht zur Apexrichtung (L. Boss)	Mittlere Bewegung total	Mittlere Parallaxe L. Boss	Mittlere Parallaxe Campbell	Mittlere Entfernung (Campbell) Sternweiten	Mittlere Entfernung (Campbell) Lichtjahre
	B	6.3 km	0″.0273	0″.0086 = 6.3 km	12.6 km	0″.0066	0″.0076	132	430
I	A	10.5	0 0408	0.0207 10.2	20.7	0.0099	0.0166	60	196
	F	14.4	0.0499	0 0403 16.2	30.6	0 0121	0.0354	28	91
	G	15.9	0 0312	0 0289 18.6	34.5	0.00 6	0.0223	45	147
II	K	16.8	0.0403	0 0304 15.1	31.9	0.0098	0.0146	68	222
III	M	17.1	0.0329	0 0282 17.1	34.2	0 0080	0.0106	94	306

Komponente der Spezialbewegung der Sterne ergibt direkt die in Spalte 7 aufgeführte mittlere Parallaxe der Sterne der einzelnen Spektralklassen. Bei der Ableitung dieser Zahlen durch L. Boss ist durch den Ausschluß der besonders großen Eigenbewegungen ein unerlaubter Zwang ausgeübt. Dieser trifft besonders die Klassen F und G, die die Sterne in der Nähe der Sonne umfassen. Befreit man die Zahlen von diesem Zwange, so entstehen die Werte der Kolumne 8 für die mittleren Parallaxen.

Die Tabelle bringt nun eine von Kapteyn und Campbell unabhängig gefundene wichtige Tatsache zum Ausdruck, nämlich die Abhängigkeit der Bewegung vom Spektralcharakter. Den Spektralcharakter betrachtet man vom astrophysikalischen Standpunkt aus als den Ausdruck des Entwicklungsstadiums der Sterne. Der innige Zusammenhang mit der Bewegung gibt dieser Ansicht eine kräftige Stütze.

Sternentwicklung.

Man deutete diese Tatsache zunächst in folgender Weise. Die in dem frühesten Stadium der Entwicklung stehenden, noch im höchsten Glutzustande befindlichen Heliumsterne haben die kleinste Bewegung, es folgen die Siriussterne, dann die Sonnensterne, und die Bewegung ist am größten bei den schon im Zustande der Rotglut befindlichen Sternen. Wenn die Sterne aus dem Nebelzustande heraustreten, so sind sie ohne Bewegung, und ihre Bewegung wird erst während der weiteren Entwicklung durch die Gravitationswirkung des gesamten Sternsystems erzeugt, und sie wächst deshalb mit der Dauer der Zugehörigkeit des Sternes zum System. Die Sterne entstehen in der Milchstraße und werden erst durch ihre Bewegungen aus derselben entfernt. Deshalb beobachten wir bei dem frühesten Typus, den B-Sternen und den noch früheren O-Sternen, die starke Zusammendrängung gegen die Milchstraße und sehen diese Zusammendrängung abnehmen beim Fortschreiten der Entwicklung bis zu gleichförmiger Verteilung bei den M-Sternen. Wäre diese Ansicht richtig, so müßten wir die M-Sterne als die durchschnittlich am wenigsten leuchtenden Sterne ansehen und könnten nur erwarten, daß sie in der näheren Umgebung der Sonne für uns sichtbar sein würden, jedenfalls nicht in gleichen Entfernungen wie die früheren Sterntypen. In der Tat aber ergibt sich für die M-Sterne eine viel größere mittlere Entfernung als für die Sonnensterne. Hertzsprung erklärte diesen Widerspruch durch den Nachweis, daß die Sterne unabhängig vom Spektralcharakter in zwei Typen zu teilen sind. Der eine Typus, „Riesensterne", sind

Riesen- und Zwergsterne.

Sterne von sehr großer, nahe gleicher Helligkeit, der andere, die „Zwergsterne", Sterne, die mit zunehmender Rotfärbung schnell an Helligkeit abnehmen. In dem der Klasse B entsprechenden Entwicklungsstadium fallen beide Typen zusammen, in Klasse A sind beide Typen noch vermischt, auch bei Klasse F sind sie noch nicht zu trennen, bei den späteren Klassen macht sich der Unterschied aber immer mehr geltend. Nun hat das Studium der Doppelsterne gelehrt, daß die Massen der Sterne nicht sehr untereinander verschieden sind, daß jedenfalls große Massenunterschiede nur ausnahmsweise auftreten, daß aber große Unterschiede in den Dichteverhältnissen bestehen. Da nun eine Zunahme der Dichte eine notwendige Folge der fortschreitenden Entwicklung ist, haben wir anzunehmen, daß die Riesensterne der Klasse M sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden; es schließen sich an die Riesensterne der Typen K, G, F, A. Die Sterne des Typus B befinden sich in einem mittleren Entwicklungszustande, und die weitere Entwicklung führt über die Zwergsterne durch die Typen A, F, G, ... bis M zurück. Im Anfange der Entwicklung ständen also Körper in einem sehr diffusen Zustande mit großer Oberfläche, es sind die Riesensterne der Klasse M. Mit zunehmender Temperatur und Zusammenziehung durchlaufen sie die Entwicklungsstadien von M bis B und dann mit abnehmender Temperatur wieder rückwärts von B bis M, bis wir schließlich in den Zwergsternen der Klasse M stark verdichtete Körper mit kleiner strahlender Fläche vor uns haben. Außerdem wohnt den großen Sternen eine kleine Bewegung, den kleinen eine größere Bewegung inne, und es durchlaufen nur die größten, also mit der kleinsten Bewegung behafteten Sterne die volle Entwicklung von M bis B und zu M zurück, während die kleineren, stärker bewegten die Höhe ihrer Entwicklung schon in einem der späteren Typen A, F, .., erreichen. Daher haben wir bei den B-Sternen nur Sterne kleiner Bewegung und sehen die Bewegung größer werden mit dem Fortschreiten in der Reihenfolge der Typen. Diese von Russell gegebene Darstellung der Sternentwicklung läßt die vorhin gegebene Erklärung der verschiedenen Verteilung der Sterntypen in bezug auf die Milchstraße bestehen.

VII. Das Sternsystem. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts war es Seeliger. Seeliger gelungen, das stellarstatistische Material auf Grund einfacher Annahmen über das Dichtigkeits- und das Helligkeitsgesetz zu einer in sich fest gefügten und plausiblen Vorstellung vom Bau des Fixsternsystems zu vereinigen, nach der sich uns das Sternsystem als ein in bestimmte Grenzen eingeschlossenes einheitliches System darstellte. Die Unabhängigkeit der Verteilung der Sterne nach der Helligkeit vom Orte und eine endliche Maximalhelligkeit der Sterne waren grundlegende Voraussetzungen für den Aufbau der Theorie. Die Ergebnisse der Forschungen der späteren Zeit lassen sich mit diesen Anschauungen durchaus vereinen. Nach einer zweiten Ausarbeitung des Zahlenmaterials ergibt sich ein linsenförmiges Stern-

system, das in der größten Ausdehnung, die in die Ebene der Milchstraße fällt, sich bis 8500 Sternweiten, in der dazu senkrechten Richtung bis 1600 Sternweiten ausdehnt. Die hellsten Sterne des Systems haben in der Einheit der Entfernung, die gleich 5 Sternweiten gewählt ist, die Helligkeit — 4.3, d. h. sie sind noch um 5.3 Größenklassen heller als ein Stern 1. Größe. Diese hellsten Sterne erscheinen an der Grenze des Systems in der Richtung der Milchstraße als Sterne 11.9. Größe und nach den Polen hin als Sterne 8.3. Größe.

Kapteyn. Als ein nur auf die Beobachtungen gestützter Versuch zur Erklärung der Bewegungserscheinungen trat neben diese an der von alters her gewohnten Vorstellung von der Einheitlichkeit und der fortschreitenden Entwicklung des Weltalls festhaltenden Theorie die Zweischwarmtheorie Kapteyns, die das große Heer der Fixsterne in zwei voneinander völlig unabhängige, sich gesetzlos durchdringende Schwärme auflöst und zunächst keinen Weg übrigzulassen schien, der zu einem Zustande des Gleichgewichts führen könnte. Näher gebracht wurde die Theorie dem Verständnis durch die Erklärung, die Turner versuchte. Nach ihm übt die ganze Masse des Sternsystems auf jedes einzelne Glied eine Anziehung aus, durch die es gezwungen wird, in langgestreckter, fast geradliniger Bahn durch das Zentrum des Systems zu schwingen. Die in der einen Richtung sich bewegenden Körper bilden den ersten, die entgegengesetzt bewegten den zweiten Schwarm, und auch der dritte von Halm eingeführte Schwarm würde eine ungezwungene Erklärung finden in den in den Umkehrpunkten der Bahnen für geraume Zeit sich in Ruhe befindenden Sternen.

Schwarzschild. Einfacher vereinte mit der Vorstellung von der Einheitlichkeit des Sternsystems die beobachteten Erscheinungen der zwei Schwärme Schwarzschilds Theorie. Wie man in der Kristalloptik bei den einachsigen Kristallen die Brechungsvorgänge dadurch erklärt, daß man annimmt, die Ätherschwingungen des außerordentlichen Strahles pflanzten sich nach den verschiedenen Richtungen mit verschiedener Geschwindigkeit, beim Bergkristall z. B. in der Richtung der Hauptachse mit größerer, senkrecht dazu mit kleinerer Geschwindigkeit fort, so daß die von einem Punkte im Innern ausgehenden Impulse nach einer bestimmten Zeit nicht auf der Oberfläche einer Kugel, wie in isotropen Medien, sondern auf der Oberfläche eines in der Richtung der Hauptachse verlängerten Rotationsellipsoides angelangt sind, so nimmt Schwarzschild auch im Sternsystem eine von Ort zu Ort sich in Größe und Richtung stetig ändernde Geschwindigkeit an und erklärt die Vorzugsrichtung der Sternbewegung als die Rotationsachse des Geschwindigkeitsellipsoides.

Charlier. Auf Grund dieser Ellipsoidtheorie entwarf Charlier einen Plan des Baues des Fixsternsystems. Für die Entfernungsmessungen läßt er sich leiten von der Annahme, daß zwischen dem Spektraltypus und der Temperatur und also auch der Leuchtkraft ein inniger Zusammenhang bestehen müsse. Wenn durch den Spektralcharakter die nahe Gleichheit der einzelnen Sterne

nach Masse und Dimensionen verbürgt ist, so kann man aus der scheinbaren Helligkeit unmittelbar die relativen Entfernungen dieser Sterne ableiten. Durch Vergleichen mit durch unmittelbare Messung gefundenen Entfernungen oder durch Verbindung von Säkularparallaxe und Radialbewegung kann man den relativen Maßstab in einen absoluten überführen und so unmittelbar zur Kenntnis der räumlichen Anordnung der Sterne durchdringen. Das System der B-Sterne, das auf diesem Wege entsteht, ist ein Sternhaufen von abgeplattet sphäroidischer Gestalt. Die Äquatorebene fällt nahe mit der Milchstraße zusammen, der Halbmesser in dieser Richtung beträgt 720 Sternweiten, während die Polarachse nur 240 Sternweiten mißt. In der Nähe des Zentrums kommt ein B-Stern auf einen kugligen Raum von etwa 20 Sternweiten Halbmesser, und die Dichtigkeit der Sternverteilung nimmt nach dem Rande zu allmählich ab. Die in die Äquatorebene fallende Komponente der Sterngeschwindigkeiten beträgt im Mittel 9.0 km in der Sekunde, die nach den Polen gerichtete 6.2 km. Der Mittelpunkt des Systems der B-Sterne, der mit dem unseres ganzen Sternsystems identisch sein wird, liegt von der Sonne aus gesehen in der Richtung auf den Punkt $\alpha = 7^h.7$, $\delta = -55^0.6$ im Sternbilde Carina etwas südlich von der Milchstraße. Die Sonne ist von diesem Mittelpunkte 88 Sternweiten entfernt. Ähnliche Untersuchungen sind von Schülern Charliers auch für die anderen Sterntypen ausgeführt; sie gestatten den Schluß, daß die Sterngeschwindigkeiten wachsen mit dem Sterntypus von den weißen nach den roten Sternen hin, und daß gleichzeitig die Verschiedenheit der Sterngeschwindigkeit nach den verschiedenen Richtungen hin kleiner wird, so daß bei den roten Sternen die Geschwindigkeitsverteilung nahezu eine sphärische ist. Die fortschreitende Entwicklung hätte bei diesen Sternen schon den Zustand des dynamischen Gleichgewichts herbeigeführt.

Das Ziel, das man bei diesen Untersuchungen im Auge hatte, war die Erkenntnis der Anordnung des Sternsystems und des allgemeinen Bewegungszustandes in demselben. Der innere Zusammenhang dieser Bewegungen und ihre Deutung, abgesehen von dem durch die Sonnenbewegung hervorgerufenen Teile, standen dabei nicht in Frage. Nach Gesetzen in den Spezialbewegungen der Sterne hatte man auch früher schon gesucht. Schönfelds Hypothese (vgl. S. 550) einer Rotation des Sternsystems um eine zur Ebene der Milchstraße senkrechte Achse mit konstanter Winkelgeschwindigkeit hatte sich als ungeeignet erwiesen. Der Gedanke, daß auch im Fixsternsystem eine Zentralkraft die Bewegungen bestimmt, scheint zu der Annahme zu berechtigen, daß zwischen den von der Erde aus gesehenen Bewegungen des Schwarmes der Kleinen Planeten und den von der Sonne aus gesehenen Bewegungen der Sterne eine Verwandtschaft bestehen müsse, und veranlaßte Oppenheim, beide Erscheinungen nach gleichen Methoden zu behandeln. Es stellte sich dabei heraus, daß im Fixsternsystem nicht so einfache Verhältnisse herrschen wie bei den um die Sonne kreisenden Planeten. Wir müssen vielmehr zur Erklärung der beobachteten Bewegungs- Oppenheim.

verhältnisse annehmen, daß wir es mit einem System mehrerer sich in Ebenen, die der Milchstraße parallel sind, bewegender Schwärme zu tun haben. Die Bewegungszentren dieser Schwärme liegen auf einer zur Ebene der Milchstraße senkrechten Achse, fallen aber nicht in einen einzigen Bewegungsmittelpunkt wie im Planetensystem zusammen.

Nebelflecke und Sternhaufen.

Als Glieder unseres Sternsystems haben wir außer den einzelnen Sternen auch die auflösbaren Sternhaufen und die meisten Nebelflecke anzusehen. Für die Sternhaufen folgt das einmal daraus, daß sie in ihrer Verteilung sich eng an die Milchstraße anschließen, und dann weiter daraus, daß wir den Sternen dieser Haufen ganz unwahrscheinlich große Dimensionen zuschreiben müßten, wenn bei der für außerhalb des Milchstraßensystems stehende Objekte anzunehmenden Entfernung die einzelnen Sterne sichtbar sein sollten. Bei der Mehrzahl der Nebelflecke müssen wir auf ihre Zugehörigkeit zum Milchstraßensystem daraus schließen, daß sie uns Sterne zeigen, die unmittelbar zu dem Nebel gehören müssen, weil sie an besonders dichten Stellen der Nebelmaterie stehen oder durch Nebelarme mit der Hauptmasse zusammenhängen. Für diese gilt dann dasselbe wie für die Sterne der Sternhaufen. Die planetarischen Nebel und die wirklichen Gasnebel, die im Spektroskop helle Linien zeigen, sind wieder in ihrer Verteilung so eng mit der Milchstraße verbunden, daß wir keinen Grund haben, sie als außerhalb unseres Sternsystems stehend anzunehmen.

Um einen Überblick über die räumliche Anordnung der Sternhaufen zu erhalten, nahm Charlier in erster Näherung an, daß ihre linearen Dimensionen so nahe einander gleich seien, daß man den scheinbaren Durchmesser einfach umgekehrt proportional der Entfernung setzen dürfe. Mit den so berechneten genäherten relativen Entfernungen der einzelnen Haufen erhält man ein Bild der räumlichen Anordnung dieser Objekte, und es zeigt sich nun, daß diese Anordnung, abgesehen von dem unbekannten Maßstabe, völlig der Anordnung des Systems der B-Sterne entspricht. Dieses Ergebnis berechtigt dann zu der Annahme, daß beide Systeme identisch sind, daß ihre Mittelpunkte also zusammenfallen, und damit wird dann auch der wahre Maßstab für die Entfernungen der Sternhaufen bekannt. Sie wären hiernach in der Ebene der Milchstraße doppelt so weit, senkrecht zur Milchstraße nur ebenso weit verstreut wie die B-Sterne.

Kugelförmige Sternhaufen.

Die als kugelförmige bezeichneten Sternhaufen erscheinen nicht nur durch ihre Gestalt und Struktur als von den gewöhnlichen auflösbaren Sternhaufen gänzlich verschieden gebaute Sternsysteme, sie verhalten sich auch in bezug auf ihre räumliche Anordnung anders als diese. Sie sind sämtlich auf einer Hälfte des Himmels vereinigt, stehen am dichtesten gedrängt im Sternbild Sagittarius, zeigen aber sonst keine Zusammendrängung gegen die Milchstraße. Ein Rückschluß auf die Entfernung aus der scheinbaren Anordnung erscheint dieser abweichenden Verhältnisse wegen nicht erlaubt. Nun zeichnen sich aber diese kugelförmigen Sternhaufen weiter dadurch aus, daß unter ihren Sternen veränderliche Sterne von sehr kurzer Periode sehr häufig

sind. Der Charakter dieser Veränderlichkeit scheint mit dem der δ Cephei-Sterne übereinzustimmen. Die δ Cephei-Sterne aber sind Riesensterne, und ihre absolute Helligkeit ist wenig verschieden. Übertragen wir diese absolute Helligkeit, wie sie an den gewöhnlichen einzeln stehenden δ Cephei-Veränderlichen beobachtet ist, auf die Veränderlichen in den Sternhaufen und vergleichen sie mit der beobachteten scheinbaren Helligkeit, so erfahren wir wieder die Entfernung. Bei diesen Sternhaufen herrscht weiter große Übereinstimmung in der Verteilung nach der Helligkeit der Sterne, und man kann deshalb aus der scheinbaren Helligkeit der hellsten Sterne zweier Haufen einen Schluß auf die relative Entfernung derselben machen und so auch die Entfernung von Haufen ermitteln, die keine kurzperiodischen Veränderlichen enthalten. Endlich gibt auch die scheinbare Ausdehnung der Haufen einen Maßstab für die Entfernung, da es erlaubt erscheint, ihre linearen Dimensionen als genähert gleich anzusehen. Auf diesem Wege kam Shapley bei den kugelförmigen Sternhaufen auf Entfernungen von Zehntausenden von Sternweiten, und da der scheinbare Durchmesser dieser kugelförmigen Haufen häufig mehrere Bogenminuten beträgt — bei ω Centauri sogar 35′ erreicht —, erhält man lineare Dimensionen dieser Haufen, die Hunderte von Sternweiten erreichen. In solchen Haufen sind oft Tausende von Sternen zusammengedrängt. Man hat empirisch das Verteilungsgesetz, das in den Haufen herrscht, ermittelt und gefunden, daß es das für eine in adiabatischem Gleichgewicht befindliche Gasmasse von kugliger Gestalt geltende ist, wenn die mit einem Verbleiben im Haufen noch zulässigen größtmöglichen Geschwindigkeiten zugelassen werden.

Spiralnebel

Als nicht zu unserem System gehörig scheinen sich sowohl durch ihre mit der Milchstraße nicht zusammenhängende Verteilung über den Himmel wie durch ihr Spektrum die Spiralnebel und einzelne Nebel von großer Ausdehnung zu erweisen. Die Spiralnebel zeigen ein kontinuierliches Spektrum, und es ist gelungen, auch das Auftreten von dunklen Absorptionslinien, die solchen im Sonnenspektrum entsprechen, nachzuweisen. Damit ist aber der Beweis erbracht, daß diese Nebel aus Sternen bestehen, daß ihre Entfernung aber sovielmal größer ist als die der Sternhaufen, daß wir die einzelnen Sterne nicht mehr zu trennen vermögen.

Die leuchtenden Nebel und die Sterne erscheinen vielerorts am Himmelsgrund eingebettet oder verhüllt durch einen Schleier aus nichtleuchtender Nebelmaterie, die sich nach Hagens Forschungen wie ein Netzwerk, am dichtesten am Nordpol der Milchstraße, von da gegen die Milchstraße hin immer weniger auffällig, über den Himmel zieht. Die kleinen leuchtenden Nebel erscheinen mit Vorliebe längs der Begrenzung dieser zusammenhängenden Massen kosmischen Nebels angeordnet. Stellenweise sind die Nebelmassen zerrissen durch Kanäle oder auch durch Buchten, deren Rand mit Sternchen besetzt ist. So gewinnt man den Eindruck, daß rund um unser Milchstraßensystem diese kosmischen Nebelmassen den Raum erfüllen und daß die kleinen leuchtenden Nebel durch das Licht sternartiger Verdichtungen

erhellte Teile dieser Nebelmassen seien. Unser Milchstraßensystem liegt in einem linsenförmigen Raume innerhalb dieser Urmassen, die uns also in der Richtung senkrecht zur Milchstraßenebene sehr viel näher sind.

Ein für eine Verwendung zur Untersuchung der Bewegungsverhältnisse der Nebelflecken geeignetes Material an Eigenbewegungen senkrecht zur Gesichtslinie liegt bislang nicht vor. Die Örter der Nebel werden bei unmittelbarer Messung bestimmt durch Anschluß an benachbarte schwache Sterne, so daß die Bewegung dieser Sterne in das Resultat mit eingeht. Eine verläßliche Trennung beider Bewegungen ist zur Zeit noch nicht durchführbar. Es liegt aber zunächst auch kein Anzeichen vor, das darauf deutete, daß die Nebel sich wesentlich anders verhalten wie die Sterne. Dagegen liegt eine Anzahl von Bestimmungen von Radialbewegungen vor, die eine Verwendung gestatten. Die von Keeler an 14 wirklichen Gasnebeln ausgeführten Messungen führten zu Bewegungen, die sich der Größenordnung nach ganz den an Sternen beobachteten Bewegungen anschließen. Sie führen zu einem Zielpunkte und einer Größe der Sonnenbewegung, die sich von den aus den Sternbewegungen abgeleiteten nicht unterscheiden. Es spricht sich also auch hierin die Zugehörigkeit dieser Nebel zu unserem Sternsystem aus. Weiter liegen aber auch für 15 Spiralnebel Radialbewegungen vor, und diese sind von einer ganz anderen Größenordnung als die der Sterne. Sie belaufen sich im Durchschnitt auf über 400 km. Diese enormen Bewegungen haben außerdem auch offenbar keine Beziehung zum Zielpunkte der Sonnenbewegung. Wir dürfen auch hierin eine Stütze der Annahme erblicken, daß diese Systeme eine Stellung für sich einnehmen.

Das Weltbild.

Suchen wir nach einem Bilde unseres Sternsystemes am Himmel, so können wir es nur in den Spiralnebeln erblicken. Der Standpunkt der Sonne in unserem Systeme müßte in der Nähe des Mittelpunktes der Spirale sein, weil die Milchstraße, die die Ebene der Spirale bezeichnet, nahezu einem größten Kreise am Himmel sich anschließt; die Sonne müßte aber etwas nördlich von der Hauptebene stehen, da die Milchstraße von ihrem nördlichen Pole um etwas mehr als 90^0 absteht und da auch die heißen, in den ferneren Teilen der Spirale gelegenen Sterne auf der südlichen Hemisphäre dichter gedrängt und häufiger sind als auf der nördlichen. Das Sternsystem selbst wird gebildet teils durch lockere Haufen von Sternen, teils durch Sternzüge und Gruppen. Zwischen ihnen befindet sich Nebelmaterie teils in größeren begrenzten Massen, teils in zwischen den Sternen sich hindurchziehenden Streifen, teils in kleineren kugligen Ballen. Diese letzteren treten besonders zahlreich an der oberen und unteren Seite des Systems auf. In den Sternschwärmen tritt uns vielleicht die Bewegung der Materie in den Armen der Spirale entgegen. Suchen wir den Mittelpunkt des ganzen Systems, so haben wir ihn in einer zur Richtung der Bewegung der beiden großen Sternschwärme senkrechten Richtung zu vermuten. Diese weist auf das Sternbild des Schwans, und der äußere Anblick der Milchstraße an dieser Stelle scheint die Annahme zu rechtfertigen. Hier würden wir den Kern

der Spirale anzunehmen haben, von dem aus sie sich in mehrfachen Windungen, die sich für uns teils decken und zwischen denen wir an anderen Stellen wieder hindurchblicken, in den Raum erstreckt. Der Mittelpunkt der Spirale ist aber nicht als der Sitz einer allgewaltigen, das ganze System beherrschenden Masse anzusprechen. Das ganze System dürfte sich vielmehr zusammensetzen aus einer großen Zahl von Einzelsystemen, in denen eine einzige oder zwei oder auch mehrere Massen die untergeordneten Massen regieren, oder auch solchen, in denen eine große Zahl von Sonnen durch die Gravitationskraft miteinander verbunden sind und nach uns noch nicht bekannten Gesetzen sich bewegen. Die Anzahl der zu dem Gesamtsysteme gehörenden Sterne dürfte Hunderte von Millionen betragen, aber trotzdem ist die Masse sehr dünn verteilt. Die Verteilung ist dichter in der Mitte und wird nach außen hin dünner. In unserer Nähe stehen die Massen etwa in Entfernungen von 600000 Erdbahnradien oder, wenn wir unsere Sonne als Norm zugrundelegen, um das 65 millionenfache ihrer Durchmesser auseinander. Nach einem häufig angewandten Bilde sind es Stecknadelknöpfe in 65 km Entfernung voneinander.

Die weitere Festigung der jetzt noch in vielen Punkten dürftigen und auf unsicherem Grunde fußenden Anschauung von der Gestaltung und den Beziehungen im Sternsysteme ist bedingt durch die Fortschritte unserer Kenntnis in bezug auf die Entfernungen, die Bewegungen und die Verteilung der Fixsterne. Direkt messend sind wir nur bis auf verhältnismäßig sehr geringe Entfernungen vorgedrungen, und es fehlt vor allem noch der sichere Zusammenhang zwischen den Resultaten, der sie in zuverlässiger Weise mit der scheinbaren Helligkeit und den Bewegungen verknüpft und in höherem Maße für die Erkenntnis des Baues des Systems nutzbar werden lassen muß. Die Sternbewegungen sind uns erschlossen für die dem freien Auge sichtbaren Sterne, der nächste Schritt bis zu den Sternen 9. Größe ist bezüglich der Eigenbewegung gut vorbereitet und einer verhältnismäßig nahen Zukunft vorbehalten. Als eine der wichtigsten Aufgaben ist hier die Beantwortung der Frage zu bezeichnen, ob die Richtung der systematischen Bewegung, die bei den helleren Sternen den Vertex bestimmt, auch für die schwächeren gilt. Es wird das von entscheidender Bedeutung für die Kenntnis des Charakters jener Bewegung sein. Von der Photographie ist hier in immer steigendem Maße wirksame Hilfe zu erwarten. Von ihr ist auch eine Lösung der mit der Bewegung der Nebel verknüpften Fragen in nicht zu ferner Zukunft zu erhoffen. Die Fortschritte in der Kenntnis der Radialgeschwindigkeiten sind in erster Linie von den technischen Hilfsmitteln abhängig. Das Material wird sich aber durch die jetzt vorhandenen Instrumente noch sehr weit vervollständigen und durch Ausdehnung auf die schwächeren Sterne erweitern und wirksamer machen lassen. Die Einbeziehung der schwachen Sterne in den Bereich der sich mit der Sternverteilung beschäftigenden Studien, wozu wieder die Photographie die Mittel bietet, dürfte den Weg ebnen zu einer sicheren und tieferen Kenntnis der hier geltenden Gesetze, die für die allgemeinen Fragen in erster Linie maßgebend sind.

Literatur.

Die Grundlagen für die genauen Bestimmungen der Fixsternörter sind von Bessel gegeben in F. W. BESSEL, Fundamenta Astronomiae pro anno 1755 deducta ex observationibus viri incomparabilis J. Bradley (Königsberg, 1818); Tabulae Regiomontanae reductionum observationum astronom. ab anno 1750 ad annum 1850 computatae (Königsberg, 1830). Weiter ist in dieser Hinsicht zu nennen: C. A. F. PETERS, Numerus constans nutationis ex ascensionibus rectis stellae polaris in Specula Dorpatensi annis 1822 ad 1838 observatis deductus (Petersburg, 1842). Eine übersichtliche Zusammenfassung der Theorien und Richtlinien der praktischen Astronomie findet man z. B. in F. COHN, Reduktion der astronom. Beobachtungen (Encyklopädie der math. Wiss. Bd. VI 2, p. 16).

Als hauptsächlichste Quellen für Sternparallaxen sind zu nennen: W. L. ELKIN, F. L. CHASE, M. F. SMITH, Catalogue of Yale parallax results (Transactions of the Astron. Obs. of Yale Univ. Vol. II p. 385). — D. GILL, Researches on stellar parallax made with the Cape Heliometer (Annals of the Roy. Obs. Cape of g. H. Vol. VIII 2). — B. PETER, Parallaxenbestimmungen am Repsoldschen Heliometer der Leipziger Sternwarte (Abhandl. der Kgl. Sächs. Gesellsch. d. Wiss. XXII, XXIV, XXX). — F. SCHLESINGER, Photographic determination of stellar parallax made with the Yerkes refractor (Astrophys. Journ. Vol. XXXIV p. 26). F. SLOCUM, S. A. MITCHELL, Stellar parallaxes from photographs made with the 40-inch refractor of the Yerkes Observatory (Astrophys. Journ. Vol. XXXVIII p. 1).

Wertvolle Zusammenstellungen der Gesamtheit der vorhandenen Bestimmungen sind gegeben in: G. BIGOURDAN, Catalogue des parallaxes stellaires (Bull. Astron. T. XXVI). — J. C. KAPTEYN, H. A. WEERSMA, List of parallax determinations (Publ. of the Astron. Laboratory at Groningen, Nr. 24).

Die im IV. Kapitel behandelten grundlegenden Anschauungen über den Bau des Sternsystems finden sich in den Werken: I. KANT, Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels (Königsberg, 1755). — J. H. LAMBERT, Kosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaues (Augsburg, 1761). — F. W. HERSCHEL, On the construction of the heavens (Philos. Transactions 1784 u. 1785); On the proper motion of the sun and solar system (ebenda, 1783); On the direction and velocity of the sun and solar system (ebenda, 1805); On the quantity and velocity of the solar motion (ebenda, 1806). — F. W. A. ARGELANDER, Über die eigene Bewegung des Sonnensystems (St. Petersburg, 1837). — J. H. MÄDLER, Die Eigenbewegung der Fixsterne (Beob. auf der Universitätssternwarte zu Dorpat, Bd. XIV). — G. B. AIRY, Movement of the solar system in space (Memoirs of the Roy. Soc. London Vol. XXVIII p. 143).

Die Grundlagen und Nachweise für die beobachteten Bewegungen sind besonders: A. AUWERS, Neue Reduktion der Bradleyschen Beobachtungen (St. Petersburg, 1882, 1888, 1903). — L. BOSS, Preliminary General Catalogue of 6188 stars for the epoch 1900 (Washington, 1910). — H. C. VOGEL, Untersuchungen über die Eigenbewegungen der Sterne im Visionsradius auf spektrographischem Wege (Publikat. des Astrophys. Observ. zu Potsdam, Bd. VII 1). — W. W. CAMPBELL, On the motion of the brighter class B stars (Lick. Bull. Vol. VI p. 101); Preliminary radial velocities of 212 brighter class A stars (ebenda Vol. VII p. 19); The radial velocities of 915 stars (ebenda Vol. VII p. 113).

Die wichtigsten neueren Arbeiten über das Problem der Sonnenbewegung sind: H. KOBOLD, Untersuchung der Eigenbewegungen des Auwers-Bradley-Kataloges nach der Bessel-

schen Methode (Nova acta der Kais.-Leop.-Akad. LXIV). — L. Boss, Precession and Solar motion I—III Paper (Astron. Journ. Vol. XXVI p. 95, 111, 187). — H. Kobold, Die Konstante der Präzession und die Bewegung des Sonnensystems untersucht auf Grundlage der Methode von Bessel (Astronom. Nachr. Bd. 150 p. 257). — J. C. Kapteyn: Star streaming (Report of the British Association in South Africa 1905); On the derivation of the constants for the two Star-Streams (Monthly Not. of the Roy. Astr. Soc. Vol. LXXII p. 743). — A. S. Eddington, On the mathematical theory of two Star-drifts and on the systematic motion of zodiacal stars (Monthly Not. of the Roy. Astr. Soc. London Vol. LXVIII p. 588). — K. Schwarzschild: Über die Eigenbewegungen der Fixsterne (Nachrichten von der Kgl. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen 1907 p. 614); Über die Bestimmung von Vertex und Apex nach der Ellipsoidhypothese aus einer geringen Zahl beobachteter Eigenbewegungen (ebenda 1908 p. 191). — J. C. Kapteyn, On certain statistical data which may be valuable in the classification of the stars in the order of their evolution (Astrophys. Journ. Vol. XXXI p. 258). — W. W. Campbell, Some peculiarities in the motion of the stars (Lick Bull. Vol. VI p. 125). — P. J. Van Rhijn, Derivation of the change of colour with distance and apparent magnitude (Groningen, 1915). — H. Seeliger, Betrachtungen über die räumliche Verteilung der Fixsterne (Abhandl. der Kgl. Bayr. Akad. XIX 3 und XXV 3); Zur Verteilung der Fixsterne am Himmel (Sitzungsber. der Kgl. Bayr. Akad. 1899 p. 363); Über die räumliche Verteilung der Sterne im schematischen Sternsystem (ebenda 1911 p. 413); Über die räumliche und scheinbare Verteilung der Sterne (ebenda 1912 p. 451). — K. Schwarzschild, Über die Integralgleichungen der Stellarstatistik (Astron. Nachr. Bd. 185 p. 81); Zur Stellarstatistik (ebenda Bd. 190 p. 361). — C. V. L. Charlier, Constitution of the Milky Way I; Studies in stellar statistics. III. The distances and the distribution of the stars of the spectral type B. IV. Stellar clusters and related celestial phaenomena (Meddel. från Lunds Astron. Observ. Ser. II Nr. 8, 14, 19). — S. Oppenheim, Über die Bahnebene der Sonne und ihr Verhältnis zur Ebene der Milchstraße (Astronom. Nachr. Bd. 204 p. 417). — W. Stratonoff, Etudes sur la structure de l'univers (Public. de l'observ. de Tachkent Vol. II, III). — H. Shapley, Studies of Magnitudes in Star Clusters. I—XI. Proc.-Nat. Acad. Washington 1916—1920 und Contributions from the Mount Wilson Solar Observatory Nr. 115 ff. — J. G. Hagen, Via lattea et via nubila. Mem. d. Soc. Astr. It. 3. Ser. Vol. I. Rom 1920. — J. C. Easton, La voie lactée dans l'hémisphère boréal (Dordrecht et Paris, 1893).

Als zusammenfassende Bearbeitungen des Gesamtgebietes der sich mit dem Sternsystem beschäftigenden Fragen sind die drei Monographien anzuführen: H. Kobold, Der Bau des Fixsternsystems (Braunschweig, 1906). — W. W. Campbell, Stellar motions with special reference to motions determined by means of the spectrograph (New Haven, 1913) — A. S. Eddington, Stellar movements and the structure of the universe (London, 1914).

DIE BEZIEHUNGEN DER ASTRONOMIE ZU KUNST UND TECHNIK.

Von

L. Ambronn.

Astronomie und Kunst.

I. Alte Instrumente. Zu allen Zeiten hat die Schönheit des gestirnten Himmels empfängliche Gemüter begeistert, und die Dichter aller Völker haben die Sonne, den Mond und die Sterne besungen. Ebenso hat auch die darstellende Kunst namentlich im Altertum vielfache Anregungen von seiten der Astronomie empfangen, indem sie ihre Motive den alten an die Gestirne anknüpfenden Mythen entnahm. Doch von alledem soll im folgenden nicht die Rede sein, sondern nur von den direkten Einflüssen, die sich aus den Erfordernissen des Baues astronomischer Beobachtungswerkzeuge für Kunst und Technik ergeben haben. Während im Altertum die Anfertigung dieser Instrumente durch Künstler und demgemäß ihre künstlerische Ausschmückung in den Vordergrund tritt, verdanken in der Neuzeit mehrere Zweige der Technik, die Uhrmacherkunst, die Feinmechanik, die Optik in erster Linie den von der Astronomie gestellten Aufgaben ihre Entstehung und hohe Entwicklung.

Alte Himmelsgloben.

Himmelsgloben und Sonnenuhren sind die frühsten astronomischen Instrumente, die wir aus Beschreibungen, aus Abbildungen sowie durch einzelne Exemplare,die bis auf unsere Zeit erhalten geblieben sind, kennen. Die ältesten Himmelsgloben, von denen berichtet wird, scheinen diejenigen von Eudoxus und Hipparch zu sein; letztere waren zur Zeit von Ptolemäus noch in Alexandrien vorhanden, wie in dessen Almagest berichtet wird. Nahe auf die Zeit des Hipparch reicht auch der älteste auf uns gekommene Globus zurück, der sogenannte „Farnesische Atlas“, der in Neapel aufbewahrt wird, aber mehr zur künstlerischen Darstellung der Sternbilder diente, als zur Angabe der Sternorte. Die Symbole der Sternbilder sind als Reliefdarstellungen auf eine Marmorkugel von 65 cm Durchmesser aufgetragen.

Die Globen von Al-Sûfi und Ulugh Beg, von denen der erstere dem 10. Jahrhundert n. Chr. und der letztere dem 15. Jahrhundert angehört, sind nicht mehr vorhanden. Der des Bagdader Astronomen war nur eine Nachbildung desjenigen von Hipparch, insofern zu seiner Herstellung das Sternverzeichnis des Almagest verwendet wurde, während der fürstliche Astronom zu Samarkand seine Nachbildung des Firmamentes zum größten Teil auf

eigene Beobachtungen gründete, nachdem er gefunden hatte, daß trotz der Reduktion mit einer Präzession von einem Grad auf 70 Jahre vielfach Abweichungen der Hipparchischen Positionen der Sterne im Vergleich mit denjenigen zu seiner Zeit vorhanden waren. Aus dem Mittelalter sind uns noch einige Globen erhalten, z. T. mit reichem Schmuck der Aufstellung, darunter ein arabischer von 1279, der sich jetzt im Mathematischen Salon in Dresden befindet, ein anderer im Germanischen Museum, den Johann Stöffler Ende des 15. Jahrhunderts gebaut hat, und in Cues a. d. Mosel ein noch etwa 100 Jahre älterer, der einst dem Kardinal Nikolaus Cusanus gehörte.

Künstlerischer Schmuck auf Globen und Sternkarten.

Die Aufstellungen der Globen haben vielfach Veranlassung zum künstlerischen Schmuck gegeben, und auch die Darstellungen der Sternbilder selbst sind, z. T. sehr wenig fördernd für die eigentlichen Zwecke, reich ausgestaltet worden und haben dann die Sterne selbst arg in den Hintergrund treten lassen. Das ist vielfach auch bei den später an die Stelle der Globen tretenden Sternkarten der Fall, obgleich diese doch nicht in ähnlich dekorativer Weise verwendet werden konnten, wie es bei der plastischen Gestaltung der Globen der Fall war. Wenn man aber z. B. die aus dem 18. Jahrhundert stammenden Karten von Flamsteed betrachtet, so wird man der künstlerischen Darstellung der Figuren der Sternbilder alle Anerkennung zollen müssen, was aber ebenfalls nicht zum Vorteil des eigentlichen Zweckes dieser Karten beiträgt. Als Verzierungen älterer Karten, zur Ausfüllung freier Stellen u. dgl. sind um jene Zeit sehr vielfach figürliche, symbolische Darstellungen der im Altertum mit Sonne und Planeten in Beziehung gebrachten Göttergestalten verwendet worden.

Sonnenuhren

In gleicher Weise sind künstlerische Bestrebungen angeregt worden durch die Sonnenuhren, die man an öffentlichen Gebäuden, an Kirchen und in Gärten anzubringen pflegte. In verschiedener Weise hat hierbei die Technik den wissenschaftlichen Anforderungen genügen müssen; denn ist es an sich einfach, eine gewöhnliche Äquatorialuhr mit senkrecht darauf stehendem Zeiger herzustellen, so wird die Aufgabe schwieriger, wenn die Sonnenuhr, wie es meistens der Fall ist, eine durch anderweitige architektonische Rücksichten bedingte Lage besitzen soll. Dann müssen Rechnungen oder Konstruktionen nach den Regeln der sphärischen Trigonometrie angestellt werden, um die Linien richtig zu ziehen, auf die der Schatten des Zeigers zur Zeit der vollen oder halben Stunden fallen muß, oder wenn die Uhr gleichzeitig Angaben über den Eintritt der Solstitien und Äquinoktien darbieten soll. Erweiterte Ansprüche an die Konstruktion werden gestellt, wenn dergleichen Uhren auch noch transportabel, also für den Gebrauch an verschiedenen Orten der Erde eingerichtet sein müssen. Aus solchen Bedingungen heraus ist eine ganze Literatur über die Herstellung von Sonnenuhren entstanden, und besonders zu letzteren Zwecken hat man herrliche kleine Kunstwerke geschaffen, die nach Ausstattung und Universalität ihrer Anwendung als Zeitmesser, Kompasse, Kalender und Sonnen- und Planetentafeln usw. kaum etwas zu wünschen übrig lassen.

Schon das Altertum kannte verschiedene Formen von Sonnenuhren, die jedoch abweichend von unseren heutigen nicht die wahre Sonnenzeit, sondern die Temporalstunden anzeigten (vgl. oben S. 97). Drei recht gut erhaltene Exemplare dieser „Skaphe" sind nach dem wertvollen Werke von H. Diels „Antike Technik" auf Tafel I abgebildet; die beiden ersten befinden sich im Berliner Museum, das dritte wurde 1854 zu Pompeji ausgegraben. Bei dem ersten Exemplar befand sich in der jetzt ausgebrochenen größeren Öffnung eine Metallplatte mit einem kleinen Loch, durch welches ein Sonnenstrahl fiel, der auf dem Netz der schräg nach unten geneigten halbkugligen Höhlung die Zeit anzeigte. Die zweite Sonnenuhr trägt vorn das Strahlenhaupt des Helios, auf der linken Seitenfläche den Kopf der Athene, rechts den des Dionysos. Die dritte, mit oskischer Inschrift, zeigt deutlich den zungenförmigen Gnomon in der Mitte der konischen Auffangfläche.

Die modernen Sonnenuhren, die jetzt noch jeder aus eigener Anschauung kennt, geben nur die sogenannte wahre Zeit, d. h. den Stundenwinkel der wahren Sonne. Zur Umrechnung in mittlere Sonnenzeit, wie sie seit Beginn des 19. Jahrhunderts in Gebrauch ist, bedarf es noch der Kenntnis der Zeitgleichung (S. 114); man findet diese daher auf den Sonnenuhren nicht selten entweder für jeden Monatsanfang in Zahlen angegeben oder häufiger als Kurve dargestellt, die in Form einer langgezogenen 8 den Mittagsstrich umläuft.

Wasser- und Sanduhren.

Neben den Sonnenuhren kommen bereits im Altertum für die Zeiteinteilung während der Nacht sowie an trüben Tagen verschiedene Formen von Sand- und Wasseruhren vor, bei denen Sand oder Wasser aus der engen Öffnung eines Gefäßes langsam und gleichmäßig ausfloß. Diese Sand- oder Wasseruhren haben lange Zeit, bis zur Einführung des Pendels oder der Schwingung schwerer oder elastischer Körper (Federn), zur Zeitmessung gedient. Ihre Konstruktionen sind sehr verschiedener Art und z. T. äußerst sinnreich gewesen, und äußerlich waren sie oft durch Beifügung von Skulpturen oder bildlichen Darstellungen hervorragend ausgestattet. Besonders die arabischen Künstler haben durch Anbringung von beweglichen Figuren, Musikanten, singenden Vögeln, Glockenspielen u. dgl. den Typus der Kunstuhr schon frühzeitig ausgebildet. Für die Genauigkeit der Zeitmessung, die jetzt bei der Anfertigung der Uhren das erstrebte Ziel ist, waren solche Zutaten nicht gerade förderlich.

Ältere Beobachtungsinstrumente.

Hat man mit den geschilderten Apparaten versucht und bezweckt, der Anschauung und dem Bedürfnis der Ordnung der Lebensweise und der gewerblichen Betriebe Genüge zu leisten, so mußten auch schon sehr früh Einrichtungen geschaffen werden, mit denen die Stellung der Himmelskörper zu jeder Zeit möglichst genau beobachtet werden konnte. So primitiv im Altertum diese Meßwerkzeuge auch waren, so hat man doch nicht unterlassen, sie nicht nur mit der erreichbaren Genauigkeit, sondern auch mit ihrem Zweck manchmal nur hinderlichem künstlerischen Beiwerk auszustatten. Es mag hier nur mit Übergehung der ältesten Apparate auf die schönen

Astrolabien, Meßringe und -platten (Scheiben) hingewiesen werden, die von den Arabern auf uns gekommen sind. Dieselben sind vielfach würdige Seitenstücke zu den Erzeugnissen des Abendlandes aus den Zeiten eines Hevelius (Danzig), eines Tycho und des Landgrafen von Hessen. Schlagen wir heute Tychos reich illustrierte Beschreibung seiner Sternwarte auf oder das Werk Chr. Hevels „Machina coelestis", so finden wir in den dort abgebildeten Instrumenten wahre Kleinode feinster Metallarbeit, sowohl was die Zusammensetzung der Instrumente zu zweckentsprechendem Gebrauche, als auch was die reiche Ausschmückung der Einzelteile und deren Ausführung in vergoldeten und reich verzierten symbolischen Darstellungen anlangt. Es mag hier als Beispiel für solche Instrumente und die darauf verwendete Kunstfertigkeit ein in Fig. 37 abgebildeter Quadrant des Hevelius dienen.

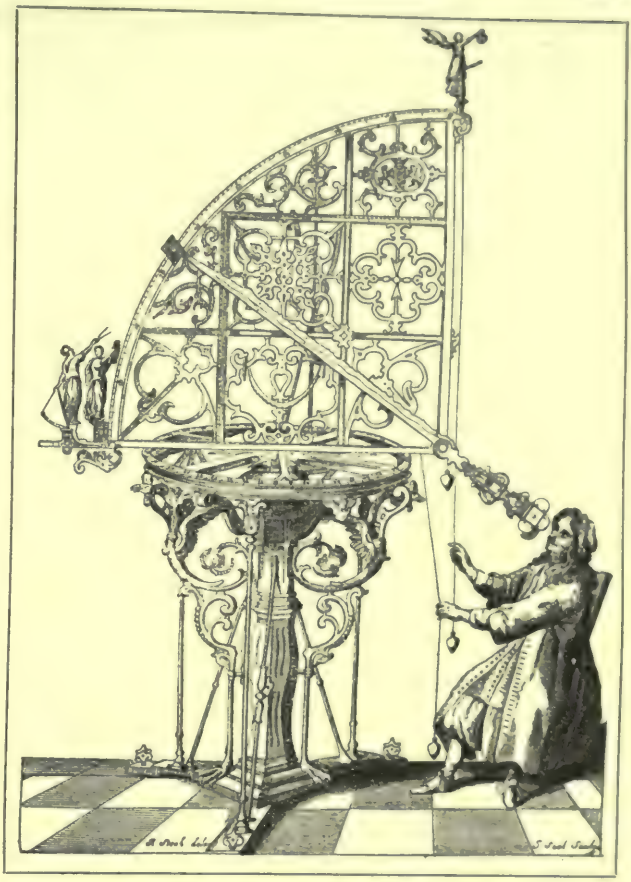


Fig. 37. Quadrant des Hevelius.

II. Vervollkommnung von Kreisteilung und Meßschraube. Die wesentlichen Grundlagen der heutigen astronomischen Meßkunst sind außer dem Fernrohr geteilter Kreis, Schraube und Uhr, und es soll daher zunächst einiges über die Herstellung und Prüfung von Kreis und Schraube gesagt werden; über Uhren wurde schon oben (S. 120) gesprochen. Kreisteilungen.

Um die Mitte des 18. Jahrhunderts werden erfolgreiche Versuche gemacht, die Genauigkeit der Kreisteilungen wesentlich zu erhöhen. Von der Einteilung des Kreises mittels direkter Teilungen durch den Zirkel geht man zu anderen Methoden über. Es sind zunächst englische Mechaniker, Hindley (ein Uhrmacher), Hook und vor allem Ramsden, die erhebliche Fortschritte machen. In Frankreich ist es der Herzog des Chaulnes und später Gambey, die Teilungen liefern, von denen gesagt wird, daß sie die Winkel

bis auf einige Sekunden richtig geben. In Deutschland ist es Reichenbach, der mit Hilfe eines sinnreichen Fühlhebelverfahrens bald Kreise einzuteilen verstand, die an Genauigkeit den besten Ramsdenschen Teilungen mindestens gleichzustellen sind. Noch heute sind Reichenbachsche Teilungen in Verwendung. Gleichzeitig mit diesen Teilmaschinen wurde auch von Johann Georg Repsold eine solche begonnen und von seinem Sohn Adolf später vollendet, auf der bis vor kurzem noch durch die direkte Handkopie die mustergültigen Teilungen der Kreise, welche an den Instrumenten dieser Werkstätte Verwendung fanden, hergestellt wurden, und sie dürften die genauesten Kreisteilungen sein, die mit den uns heute zu Gebote stehenden Mitteln erlangt werden können. Aber das Verfahren ist äußerst umständlich, zeitraubend und erfordert eine große Rücksichtnahme auf die verschiedensten Umstände, wie Einfluß der Körperwärme des Teilenden, sehr feste Aufstellung der Maschine, wenn möglich unausgesetzte Arbeit, um neue Anfangsstellen zu vermeiden und dergleichen mehr.

Automatische Kreisteilmaschinen.

Diese Übelstände hat man zu beseitigen versucht durch automatisch arbeitende Kreisteilmaschinen. Die erste dieser Art ist von dem Mechaniker Oertling in Berlin gebaut worden. Sie ist ein Meisterstück technisch vorzüglicher Arbeit. Leider ist sie nur sehr wenig benutzt worden und steht heute im Deutschen Museum zu München. Nach gleichem Prinzip sind aber später eine ganze Anzahl Teilmaschinen ausgeführt worden, so von Sécretan in Paris, von der Société Génévoise in Genf und in Deutschland von Th. Wegener in Berlin, Max Ott in Kempten und neuerdings von Gustav Heyde in Dresden. Alle diese Maschinen und auch weiterhin die amerikanischen von Buff & Berger und von Saegmüller beruhen auf der Anwendung der Tangentialschraube als Bewegungsmechanismus für den Mutterkreis, auf dem zunächst die Originalteilung mittels eben dieser Schraube hergestellt wurde und durch die ihrerseits nach sorgfältiger Prüfung die Schraube selbst wieder kontrolliert werden kann.

Fehler von Kreisteilungen und Schrauben.

So sorgfältig aber auch diese Einrichtungen bei den besten dieser Maschinen ausgeführt sind, und so vorsichtig man bei ihrer Anwendung zur Teilung von Kreisen, die konzentrisch zu dem Mutterkreis auf diesem befestigt werden, auch vorgeht, so ist es doch nicht möglich, absolut genaue Kreisteilungen auf diese Weise herzustellen, sondern es werden immer noch Fehlerquellen verschiedener Art vorhanden sein, die die Genauigkeit der Teilung beeinträchtigen. Einmal sind diese Ursachen in dem Zustande der Schraube und zum andern in ungleichmäßiger Materialbeschaffenheit sowie darin zu suchen, daß periodisch wirkende Exzentrizität der Aufspannung des zu teilenden Kreises, nachträgliche Spannungsänderungen und derartige Ursachen bei der Anwendung des Kreises zu Winkelmessungen mitsprechen. Es bedarf daher nicht nur der größten Geschicklichkeit und technischen Fertigkeit des Mechanikers, sondern der Gelehrte muß doch noch dafür aufkommen, daß ihm das winkelmessende Werkzeug die denkbar besten Resultate zu erlangen gestattet. Einmal galt es Methoden anzugeben, die die Fehler

einer Schraube zu bestimmen gestatten mit einer Genauigkeit, die eben nur bei astronomischen oder geodätischen Messungen gefordert wird, und andererseits war es auch nötig, die Abweichungen der Teilstriche auf einem Kreise von ihrer idealen Stellung aufzufinden. Ganz ähnliche Untersuchungen sind auch durchzuführen, wenn es gilt, die richtige Einteilung und die genaue Gesamtlänge eines geradlinigen Meßstabes zu ermitteln, oder wenn Schrauben als messende Teile in Mikrometerapparaten verwendet werden.

Es ist gerade die Meßkunst der Astronomen gewesen, welche die schärfsten Untersuchungsverfahren nötig gemacht hat, um schließlich Resultate von der Genauigkeit zu erhalten, wie sie gegenwärtig als etwas Selbstverständliches angesehen werden; die „astronomische Genauigkeit" ist sprichwörtlich geworden.

Bestimmung der Fehler.

In allen diesen Dingen hat der Astronom Friedrich Wilhelm Bessel bahnbrechend gewirkt. Ihm ist es zu Anfang seiner Tätigkeit in Königsberg gelungen, mit einem alten Caryschen Höhenkreis Beobachtungen auszuführen, welche alle bis dahin bekannten an Genauigkeit übertrafen. Es war ausschließlich ein Resultat der sorgfältigsten Untersuchung und genialen Anwendung des alten Kreises. Bessels Untersuchungen der Schrauben seines Heliometers haben die grundlegenden Vorschriften für die Prüfung der Meßschrauben geliefert. Die Möglichkeit, eine vom geschickten Mechaniker gefertigte Schraube genau auf die ihr noch anhaftenden Fehler hin zu untersuchen, und die Art, diese Fehler aufzudecken, gibt wieder dem Mechaniker die Fingerzeige, wie er eine solche Schraube verbessern muß.

Schraubenuntersuchung.

Soll eine Schraube zu scharfen Messungen verwendbar sein, so muß von ihr gefordert werden, daß sie einen bestimmten Instrumententeil bei gleichem Drehungswinkel auch immer um die gleiche Strecke verschiebt. Auf dieser Forderung baut sich auch das Untersuchungsverfahren auf, indem man eine als konstant anzusehende Strecke der Reihe nach auf der Schraube entlang schiebt und an einer auf diese aufgesetzten geteilten Scheibe abliest, ob stets der gleiche Drehungswinkel der Verschiebung um diese Strecke entspricht. Aus den hierbei sich ergebenden Differenzen lassen sich die Fehler der Schraube genau berechnen bzw. die Verbesserungen, die man in jedem Falle an den mit dieser Schraube gemachten Messungen anzubringen hat, um die Resultate so zu erhalten, wie sie eine ideale, vollkommen fehlerfreie Schraube ergeben würde.

Es wird hier von Interesse sein zu sehen, um welche linearen Beträge es sich bei diesen Fehlern handelt. Bei einer sorgfältig hergestellten Schraube, deren Ganghöhe nahe 0.5 mm beträgt, kommen Unterschiede vor, die wenige Tausendstel der Schraubenumdrehung betragen. Das sind also lineare Fehler von Tausendstel Millimetern und Bruchteilen davon, Strecken, welche mit den besten Mikroskopen noch eben wahrgenommen werden können, ja Strecken, die häufig nur von der Größe der Wellenlänge des Lichts sind. Der Astronom oder Geodät ist in der Lage, solche Beträge noch aufzufinden,

ihre Ursuchen anzugeben und für die Abstellung der Fehlerquellen dem Mechaniker die zweckentsprechenden Vorschläge zu machen.

Kreisuntersuchung.

Es zeigt sich hier, in wie hohem Maße die Anforderungen, die der Astronom an seine Meßwerkzeuge zu stellen genötigt ist, auf die Vervollkommnung des technischen Arbeitsverfahrens einzuwirken vermocht haben. In gleicher Weise haben auch die großen Anforderungen, welche der Astronom an die Einteilungen der Kreise stellt und an deren zweckentsprechende Herstellung und Verbindung mit den anderen Instrumententeilen, zu einer weitgehenden Vervollkommnung der Technik geführt.

Hat man früher diese Kreise oder Teile derselben, welche die zum Messen der Winkel erforderlichen Teilungen tragen, vielfach nach äußerlichen Gesichtspunkten mit mehr oder weniger reichen Verzierungen angefertigt, so hat man etwa mit Beginn des 19. Jahrhunderts auch darin Wandel geschaffen und sich nach dem Vorgehen von Ramsden, Reichenbach und anderen ausschließlich von technischen Gesichtspunkten, die auf den Erfahrungen der damals lebenden Astronomen fußten, leiten lassen. Flamsteed, Bradley, Bessel und deren Nachfolger hatten wohl erkannt, daß das am einfachsten konstruierte Instrument auch stets die zuverlässigsten Resultate geben werde, da dann alle Teile den auf sie wirkenden äußeren Einflüssen, wie Temperatur, Schwerkraft usw. am besten frei folgen können und die dadurch hervorgebrachten Änderungen der idealen Gestalt oder Lage der Rechnung zugänglich bleiben. Jede Komplikation des Baues erschwert den Überblick und die rechnungsmäßige Auswertung der Messungsresultate.

In welcher Weise die rein mathematischen Überlegungen bei solchen Untersuchungen verwertet werden können, und wie diese selbst wieder dazu dienen, die Wege zur Verbesserung der mechanischen Arbeitsmethoden zu zeigen und ein Maß zu schaffen für die erlangte Genauigkeit, möchte ich kurz erläutern an dem Beispiel der Untersuchung der Winkelteilung eines Kreises. Allerdings kann eine solche Arbeit hier nur in ganz allgemeinen Zügen geschildert werden, da eine genaue Auseinandersetzung viel zu weit ab von dem Zweck dieser Darlegungen führen würde.

Geht man darauf aus, die Abweichungen der Intervalle zwischen zwei Teilstrichen eines Kreises von ihrem Sollwerte festzustellen, so hat man als Ausgangswert eben nur den vollen Umkreis zu 360 Grad. Denkt man sich einen Winkel, welcher z. B. 60 solcher Grade fast genau umfaßt, so auf den Kreis abgetragen, daß der eine Schenkel mit dem Teilstrich, welcher die Bezifferung 0 trägt, zusammenfällt, so wird der andere Schenkel sehr nahe mit dem Teilstrich 60 zusammenfallen. Die Abweichung des 60er Teilstriches von dem Ort des zweiten Schenkels würde der Fehler in der Lage dieses Teilstriches sein, wenn eben der benutzte Winkel genau 60^0 betragen hätte. Dieser Forderung kann man aber in Wirklichkeit nicht genügen, denn wenn nun der Vergleichswinkel von nahezu 60^0 weiterhin noch 5mal angetragen wird, so müßte man, falls er richtig wäre, genau wieder auf den Ausgangspunkt zurückkommen. Das wird aber im allgemeinen nicht der Fall sein.

Werden nun die Abweichungen an den Strichen 60, 120, 180 usw. in Vergleichung gebracht mit dem schließlichen Unterschied gegen den Ausgangspunkt, so kann man auf rechnerischem Wege die Fehler der 6 Striche mit Bezug auf den Ausgangsstrich (hier der Nullstrich) bestimmen. Solche Vergleiche macht man nun nicht nur mit dem Winkel von nahezu 60°, sondern auch mit mehreren anderen, z. B. mit solchen von 45°, 30°, 15°, 12° usw., und alle diese Vergleichungen, die sich z. T. wieder an dieselben Striche anschließen, werden dann einem gemeinsamen Rechnungsverfahren unterworfen, welches für die beobachteten Striche die wahrscheinlichsten Verbesserungen gegen ihre ideale Lage zu ermitteln gestattet. Die zweckmäßige Anordnung solcher Untersuchungsmethoden ist von Hansen, Schreiber und Bruns eingehend bearbeitet worden, und diese haben auch praktische Vorschriften für die rechnerische Ausführung solcher äußerst umfangreicher Arbeiten gegeben. Die allgemeinen Grundlagen für solche Rechnungen, bei denen es sich um die Ableitung der möglichst richtigen Resultate aus angestellten Beobachtungsreihen handelt, sind in ihrer völligen Allgemeinheit von Gauß entwickelt worden und unter dem Namen der „Methode der kleinsten Quadrate" bekannt. Erst durch ihre Einführung in die Bearbeitung exakter Messungsergebnisse ist es möglich geworden, in objektiver Weise, d. h. unabhängig von jeder willkürlichen Beurteilung der Genauigkeit der Einzeldaten astronomischer, geodätischer oder auch physikalischer Messungen das denkbar Richtigste, d. h. dasjenige Resultat abzuleiten, welches die größte Wahrscheinlichlichkeit besitzt, oder, anders ausgedrückt, dasjenige, welches am wenigsten von dem wahren Wert des Resultates abweicht.

Bedeutung des Fernrohres für die Astronomie.

III. Das Fernrohr. Die Einführung des Fernrohrs in die astronomische Meßkunst hatte zwei wesentliche Vorteile. Zunächst wurde es allerdings nur dazu verwendet, zölestische und terrestrische Objekte dem Auge scheinbar näher zu bringen, dieselben in vergrößerter Flächenausdehnung wahrzunehmen, besonders, soweit es sich um die Körper unseres Sonnensystems handelt. Damit zugleich war aber auch die Möglichkeit gegeben, die Einzelheiten der Objekte sicherer zu definieren, was weiter zur Folge hatte, daß die Einstellung der Fernrohrachse, die an die Stelle der einfachen Diopter durch Einführung der Fadenkreuze getreten war, auf bestimmte Punkte der betrachteten oder anvisierten Objekte, mit wesentlich größerer Schärfe ausgeführt werden konnte. Die Verbindung des Fernrohrs mit den astronomischen Meßinstrumenten und die Verbesserung des ersteren in seinen optischen und mechanischen Teilen nimmt von da an einen ganz hervorragenden Platz in der astronomischen Beobachtungskunst ein, und die stete Vervollkommnung des Fernrohrs ist auf das engste mit den stetig wachsenden Anforderungen der Astronomen an dasselbe verknüpft, wenn natürlich auch andere Gebiete der Forschung (Mikroskopie) und der Technik und besonders in den letzten Jahrzehnten die Bedürfnisse der Photographie nicht geringen Anteil an der Ausgestaltung der Optik haben. Aber auch die photo-

graphischen Beobachtungsverfahren sind während der letzten 30—40 Jahre in hohem Maße der astronomischen Forschung dienstbar gemacht worden, so daß auch in dieser Beziehung eine fortlaufende Wechselwirkung zwischen Astronomie und Technik besteht.

Erste Entdeckungen Galileis.

Sofort nach der Erfindung des Fernrohrs wurde dieses durch Galilei in seiner ursprünglichen Form zur Betrachtung der Gestirne verwendet. Er entdeckte mit einem von ihm selbst nach Angaben, die er aus Paris erhalten haben dürfte, zusammengesetzten Instrumente die Sichelgestalt der Venus, die Gebirge auf dem Mond und die Satelliten des Jupiter. Schon im Jahre der Erfindung 1608 waren Fernrohre (Perspizillen) in Paris, Frankfurt a. M. und anderen hervorragenden Verkehrszentren bekannt und käuflich zu erwerben.

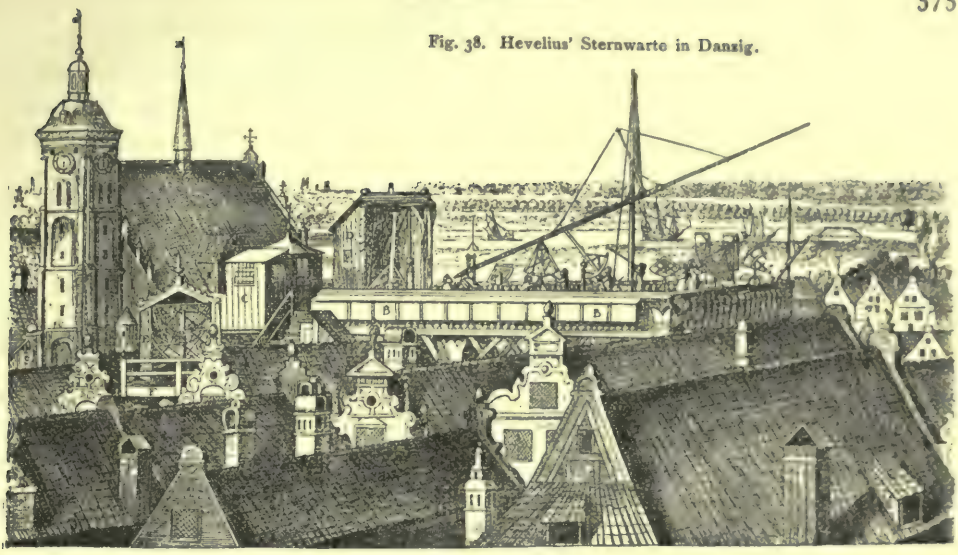
Die erste (holländische) Fernrohrkonstruktion, die aus der Verbindung einer dem Gegenstand zugewendeten Konvexlinse und einer dem Auge nahe stehenden Konkavlinse bestand, wird dadurch gekennzeichnet, daß das mit ihrer Hilfe vom Auge wahrgenommene Bild des Gegenstandes zwar in gleicher Stellung wie in der Natur erscheint, daß aber die Vergrößerung, die das Instrument zu gewähren vermag, d. h. der Quotient aus dem Winkel, unter dem die Sehstrahlen nach dem Durchgang durch das Fernrohr in das Auge gelangen, dividiert durch denjenigen, welchen sie ohne Zwischenschaltung des Fernrohrs am Auge bilden, nur gering sein kann. Dieser Umstand veranlaßte Kepler, an die Stelle der konkaven Augenlinse auch eine konvexe Linse zu setzen, wodurch er bewirkte, daß das von der Vorderlinse (dem Objektiv) erzeugte Bild erst wirklich zustande kommt und dann erst von der Augenlinse mit der Wirkung einer Lupe betrachtet wird. Bringt man im Fernrohr an dem Orte des Bildes ein Fadenkreuz an, so wird dieses mit dem beobachteten Gegenstande durch das Okular gleichzeitig scharf gesehen, man kann das Fadenkreuz somit auf die einzelnen Teile des Gegenstandes scharf einstellen und letzteren auf diese Weise einer Ausmessung unterwerfen. Darin liegt neben dem größeren Gesichtsfeld der Hauptvorzug des Keplerschen Fernrohrs vor dem holländischen. Daß im Keplerschen Fernrohr die beobachteten Gegenstände in umgekehrter Stellung gesehen werden, ist für astronomische Objekte ohne Belang. Für die Astronomie ist die weitere Ausgestaltung des Keplerschen, oder, wie es auch vielfach genannt wird, „astronomischen" Fernrohrs allein von Bedeutung.

Das Keplersche Fernrohr.

Fehler der Objektive.

Ohne hier auf manche zwischenliegende Entwicklungsstufen näher einzugehen, soll sogleich auf einen Mangel hingewiesen werden, der allen aus Linsen gebildeten, d. h. auf die dioptrischen Vorgänge in solchen gegründeten, Sehwerkzeugen eigen ist. Das ist die mit der Ablenkung der Lichtstrahlen bei ihrem Übertritt von einem Medium in ein anderes von verschiedener Dichtigkeit eintretende Dispersion, die Zerlegung in die verschiedenen Farben. Ist der erstere Vorgang für das Zustandekommen der Abbildung unbedingt erforderlich, so ist die zweite Eigenschaft für die Schärfe und Deutlichkeit des erzeugten Bildes von nachteiligster Wirkung, wird doch

Fig. 38. Hevelius' Sternwarte in Danzig.



dadurch bedingt, daß die Bilder, welche die verschiedenen Strahlengebiete zustande kommen lassen, nicht in gleicher Entfernung von der Linse liegen, dadurch verschieden groß werden und so das, was wir als Gesamtbild mit unserem Auge wahrnehmen, stets mit farbigen Rändern umgeben erscheinen lassen. Außerdem ist es aus rein technischen Gründen zunächst nur möglich, größeren Linsen eine sphärische Gestalt ihrer Oberfläche zu geben, wodurch von denselben eine streng punktweise Abbildung der Objekte nicht erzeugt werden kann. Das Bestreben, diese beiden Nachteile einfacher Linsen bei ihrer Benutzung für Fernrohre, Mikroskope und später für photographische Apparate zu beseitigen, um vor allem den Anforderungen der Astronomen zu genügen, ist für die Entwicklung der Glaserzeugung und für die optischen Werkstätten bis auf den heutigen Tag der Antrieb zu außerordentlich vielen, höchst wertvollen und weitgehenden Arbeiten und Verbesserungen geworden.

Damit in direkter Verbindung stehen die Untersuchungen einer Reihe der bedeutendsten Mathematiker über den Strahlengang in Linsensystemen und der Physiker über die Eigenschaften des Lichts und seiner Veränderung beim Übergang von einem Medium in ein anderes.

Lange Fernrohre.

Man hatte zunächst versucht, die Mängel der Abbildung in den ersten Fernrohren, die besonders bei der Anwendung stärkerer Vergrößerungen fühlbar wurden, dadurch zu beseitigen, daß man den Fernrohren eine im Verhältnis zu ihrer Öffnung sehr große Länge gab, denn es zeigte sich, daß dadurch sowohl die Unschärfe als auch, bis zu einem gewissen Grade, die farbigen Ränder der Bilder behoben werden konnten. Dieser Weg führte allmählich zu enormen Dimensionen der Fernrohre, wie sie von Divini, Campani in Mailand, Auzout in Paris und später in Deutschland von dem Danziger Astronomen Hevelius (Höwelke) mit 20—30 m Länge angefertigt und benutzt wurden. Ein solches Fernrohr ist in Fig. 38 zu sehen, die eine Ansicht von dem Danziger Observatorium gibt, welches leider im Jahre 1679

durch eine Feuersbrunst vernichtet wurde. Man erkennt sofort, daß es bei der großen Länge der Fernrohre häufig nicht mehr möglich war, Objektiv und Okular durch ein wirkliches Rohr zu verbinden, sondern, daß an dessen Stelle lange Stangen traten, die nur eine mangelhafte Verbindung beider Teile gewähren konnten. Ja auch diese Verbindung mußte bei einigen der Campanischen Instrumente weggelassen werden; man brachte das Objektiv am Ende eines hohen Mastes an, und das Okular wurde ganz gesondert davon gehandhabt, während mittels Rollen und Schnurläufen dem Objektiv die erforderliche Stellung gegeben werden mußte.

Diese primitiven Anordnungen, die aber z. T. äußerst komplizierte mechanische Einrichtungen und die gleichzeitige Tätigkeit einer ganzen Anzahl eingeübter Hilfskräfte erforderten, konnten natürlich nicht zu guten Erfolgen führen; gleichwohl ist manche wichtige Beobachtung mit solchen Fernrohren gelungen.

Die Spiegelteleskope.

Diese Umstände und die damaligen Ansichten über die Natur des Lichts, über die ja ein langer Streit zwischen Newton und Huygens und ihren Schülern und Anhängern schwebte, ließen auf Grund der Versuche Newtons die Meinung entstehen, daß man auf dem eingeschlagenen Wege, nämlich durch die Vergrößerung der Brennweite der Fernrohrobjektive, nicht dazu gelangen könne, besonders farbfreie Abbildungen der beobachteten Objekte zu erlangen, denn sobald man die Objektive vergrößerte, um mehr Lichtstrahlen zur Erzeugung der Bilder zu gewinnen, traten die farbigen Ränder der Bilder und ihre wachsende Undeutlichkeit wieder stärker störend in Erscheinung. Deshalb schlug Newton vor, zur Erzeugung der Bilder nicht Linsen, sondern Hohlspiegel zu verwenden. Werden durch Reflexion an solchen die Lichtstrahlen zum Bilde vereinigt, so findet eine Zerlegung des Lichtes in seine einzelnen Farben nicht statt, während doch Bilder der Objekte zustande kommen; allerdings wird dabei der Gestaltfehler, solange die Spiegel sphärisch geschliffen sind, auch nicht beseitigt werden können, doch wußte man, daß diese Fehler weit weniger störend für die Bildqualität sind.

Der erste Gedanke zu einem derartigen Fernrohre rührt von Niccola Zucchi her, der ihn in seiner Optica phil. 1652—1656 ausgesprochen hat. Er betrachtete, so wie das beim Galileischen Fernrohre geschieht, das von dem Hohlspiegel entworfene Bild durch eine Konkavlinse und erhielt damit aufrechte Bilder. Später hat Mersenne und darauf Gregory, indem sie die Strahlen an einem kleinen Spiegelchen reflektieren ließen und sie dann durch eine Öffnung im Hauptspiegel mittels einer Okularlinse betrachteten, die Konstruktion wesentlich verbessert.

Kurze Zeit darauf (1671) war aber von Newton diejenige Anordnung des Spiegelteleskops angegeben und ausgeführt worden, welche noch heute seinen Namen trägt. Im Jahre 1672 wurde dann auch von Cassegrain im Journal des Savants der Vorschlag gemacht, den Gregoryschen kleinen Hohlspiegel durch einen Konvexspiegel zu ersetzen und dadurch die Länge des Fernrohrs erheblich zu vermindern.

Alle Mühe und aller Scharfsinn der Astronomen und Optiker war im 18. Jahrhundert zunächst darauf gerichtet, die Spiegelteleskope zu verbessern, während die Linsenfernrohre vernachlässigt wurden. Erst die Untersuchungen von Euler veranlaßten den englischen Optiker John Dollond, Newtons Versuche nachzuprüfen. Das Resultat war, daß Dollond durch sinnreiche Versuche mit einem in ein Wasserprisma gestellten Glasprisma fand, daß wohl eine Farbenzerstreuung stattfinden könne, ohne daß eine Gesamtbrechung der von dem Objekt kommenden Strahlen stattfand, dieses also am gleichen Ort erschien, an dem es das Auge erblickte, wenn das Prismensystem ausgeschaltet wurde, aber das Bild hatte farbige Umrandung. Die umgekehrte Versuchsanordnung brachte nun Dollond auf den Gedanken, statt Glas mit Wasser zu kombinieren, dieses auch einmal mit zwei verschiedenen Glassorten zu tun. Der Versuch gelang, und er konnte zeigen, daß zwei geeignete Prismen von Glas, hintereinander geschaltet, wohl eine Brechung des Lichts, aber keine merkliche Farbenzerlegung hervorbrachten. Nun schliff er statt der Prismen zwei Linsen, die eine aus dem dichteren Flintglase, die andere aus dem leichteren Crownglas, deren Brechungsindices sich etwa wie 16 : 15 verhielten. Nach vielen Versuchen, entsprechende Linsen praktisch herzustellen, gelang es ihm endlich 1758, ein Fernrohr von etwa $1\frac{1}{2}$ m Brennweite zu bauen, welches nahezu farblose Bilder gab. Achromatische Objektive.

Das der Royal Society vorgelegte Fernrohr übertraf an Deutlichkeit die Bilder der früheren Fernrohre von 3- und 4-fach größeren Dimensionen.

Damit war ein großer Schritt sowohl für die astronomische Forschung wie auch für die Konstruktion anderer wichtiger optischer Instrumente getan.

Euler stand zunächst dieser Erfindung sehr skeptisch gegenüber, aber schließlich wurde er durch die Untersuchungen von Ziehrer davon überzeugt, daß der Bleigehalt der Gläser wesentlich die verschiedenen Brechungsverhältnisse bedingte und es daher doch einzusehen sei, daß sich seine Theorie mit dem Dollondschen auf empirischem Wege gefundenen Resultate vereinigen lasse.

Während dieser Untersuchungen und wissenschaftlichen Kontroversen über den Verlauf des Strahlenganges in verschiedenen Medien hatte man aber eifrig an der Verbesserung und Ausgestaltung der Reflektoren gearbeitet. Vervollkommnung der Spiegelteleskope.

Sowohl die Herschelsche Konstruktion der Spiegelteleskope als auch die nach Newtonschem Prinzip konstruierten haben den Nachteil, daß das Auge des Beobachters nicht nach dem Gestirn gerichtet ist, sondern im ersteren Falle entgegengesetzt und im zweiten Falle senkrecht zum ankommenden Lichtstrahl. Das bildet eine Unbequemlichkeit, die besonders bei der schwierigen Handhabung der großen Instrumente für die Aufsuchung der Gestirne nicht ohne Bedeutung ist. Bei der von Gregory angegebenen Konstruktion fällt dieser Übelstand weg, aber dafür hat dasselbe einen anderen, nämlich den, daß durch die Verwendung zweier Hohlspiegel die sphärischen Fehler der Abbildung vergrößert werden. Deshalb schlug Cassegrain, welcher wenig später als Newton die nach ihm benannten Konstruk-

tionen angab, vor, statt des konkaven „kleinen" Spiegels einen konvexen zu wählen, denn dadurch würden bei der zweiten Reflexion die Fehler des konkaven Auffangespiegels mit umgekehrter Wirkung das Zustandekommen des Bildes beeinflussen und so dasselbe verbessern. Außerdem konnte das Teleskop bei gleicher Brennweite wesentlich verkürzt werden, denn die Vereinigung der Strahlen zum Bilde findet dabei erst nach ihrer Reflexion am kleinen Spiegel statt, und dazu kommt wieder der Vorteil, daß das Auge des Beobachters nach dem anvisierten Objekte gerichtet ist. Mit der Verkürzung des Fernrohrs wird aber auch seine Montierung erheblich erleichtert, und die Bewegungseinrichtungen erhalten eine größere Freiheit in ihren konstruktiven Teilen.

Die Aufstellung der großen Instrumente und ihre Handhabung stellten an den mechanischen Betrieb große Anforderungen, und so kam es, daß z. B. Lord Rosse sich bei seinem Instrumente, dessen Spiegel eine Öffnung von 1,83 m bei einer Brennweite von 16,2 m besitzt, darauf beschränkte, diesem nur eine geringe Bewegungsmöglichkeit zwischen zwei meridionalen Mauern zu geben, so daß nur in kleinen Stundenwinkeln und auf der Südseite des Meridians beobachtet werden kann.

Foucaults Glasspiegel.

Die Herstellung der großen Spiegel aus Spiegelmetall bot so große Schwierigkeiten, daß Foucault 1875 den Vorschlag machte und ihn auch bei einem nach Newtons Konstruktion für Paris gebauten Reflektor ausführte, die Spiegel aus Glas herzustellen und sie auf der Vorderseite zu versilbern. Bei dem in neuester Zeit wieder einsetzenden Bau solch großer Reflektoren werden ausschließlich diese versilberten Glasspiegel verwendet.

Fraunhofer.

Der Wettstreit zwischen Refraktor und Reflektor schien am Ende des 18. Jahrhunderts trotz der Erfolge Dollonds unbedingt zum Vorteil des letzteren entschieden zu sein, bis durch die Arbeiten des genialen Optikers Joseph Fraunhofer sich die Verhältnisse wieder sehr erheblich zugunsten des Linsenfernrohrs änderten. Fraunhofer war es beschieden, nach zwei Richtungen hin die Linsenfernrohre zu vervollkommnen. Einmal dadurch, daß er die Verbesserung der Glastechnik durch eigene Schmelzungen in der neu errichteten Glashütte zu Benediktbeuern mit bestem Erfolge unternahm, und andererseits durch seine an den neu hergestellten Glasarten vorgenommenen physikalischen Untersuchungen. In Fraunhofers Arbeiten tritt der Einfluß, den die wissenschaftlichen Forschungen auf die Ausgestaltung technischer Methoden und gegenseitige Förderung beider ausüben, in typischer Form vor Augen.

Fraunhofer suchte zunächst für den rein technischen Zweck der Konstruktion achromatischer Objektive nach einer schärferen Definition der einzelnen Farben. Seine klug und sorgfältig ausgeführten Versuche wurden durch die Entdeckung der nach ihm benannten dunklen Linien im Sonnenspektrum belohnt, mit deren Benutzung es möglich wurde, bestimmte Lichtstrahlen — also Licht von ganz bestimmter Wellenlänge — bei ihrem Durchgang durch die verschiedenen Glasarten, genau zu verfolgen. Dadurch ge-

lang es erst, die Gesetze der Brechung und der Dispersion mit Sicherheit aufzustellen und zu zeigen, daß bei der Wahl zweckentsprechender Glasarten und diesen angepaßter Gestaltgebung der Linsen es allerdings möglich ist, Fernrohrobjektive herzustellen, durch die sowohl die chromatischen als auch die sphärischen Bildfehler bis auf ein Minimum vermieden werden können. Fraunhofer hat selbst, obgleich ihm nur eine kurze Wirksamkeit beschieden war, noch Objektive bis zu 250 mm Durchmesser geschliffen, von einer Vollkommenheit, die selbst heute kaum übertroffen werden kann.

Abbe und Schott

Die von Fraunhofer gewählte Form der beiden das Objektiv zusammensetzenden Linsen wird gegenwärtig bei zweiteiligen Linsen noch meistens angewendet, wenn auch durch die großen Fortschritte, die in den letzten 40—50 Jahren die Glastechnik durch die systematischen Untersuchungen von Abbe und Schott aufzuweisen hat, mancherlei Änderungen in der Objektivkonstruktion herbeigeführt worden sind. Besonders muß aber erwähnt werden, daß es durch eben diese Versuche gelang, Glasflüsse herzustellen die, was Brechung und Dispersion anlangt, in sehr weiten Grenzen den verschiedensten Bedingungen, die der Optiker zu stellen hat, genügen können. Fraunhofer hat sich noch im wesentlichen mit drei oder vier verschiedenen Arten von Crown- und Flintglas begnügen müssen, die ihm in größeren, für optische Zwecke verwendbaren Schmelzungen gelangen. Heute stehen deren Dutzende zur Verfügung, so daß daraus je nach dem speziellen Zweck gewählt werden kann. Zu Fraunhofers Zeiten wurde an ein gutes Fernrohrobjektiv allerdings auch nur die Anforderung gestellt, daß es die für das menschliche Auge besonders wirksamen Strahlengebiete in bester Weise zum Bild vereinige, heute fordern aber die Astrophotographie und die Astrophysik, daß auch die aktinisch wirksamen Strahlengebiete ebensogut zum Bilde vereinigt werden müssen, wie die sichtbaren Strahlen. Diese Forderung machte es auch nötig, die Licht absorbierenden Eigenschaften verschiedener Glasarten näher zu untersuchen und solche Schmelzungen herzustellen, die in dieser Richtung besonders für die stärker brechbaren Strahlen — von geringer Wellenlänge — günstige Bedingungen bieten. Auf Grund dieser Forderungen sind die neuen, die ultravioletten Strahlen besonders durchlassenden Gläser, die sogenannten U. V.-Gläser, in Jena entstanden.

Optische Prüfungsmethoden.

Direkt von der Astronomie ist auch noch ein letzter großer Fortschritt in der Herstellung der Linsen und Spiegel ausgegangen. Wie wir oben sahen, daß die Vervollkommnung der Meßschrauben und der Kreisteilungen Hand in Hand ging mit der Untersuchung der Fehler dieser Hilfsmittel seitens des beobachtenden Astronomen, so war auch die höchste Vollkommenheit der optischen Apparate erst zu erreichen, nachdem man ihre Fehler in allen Einzelheiten genau zu messen gelernt hatte. Zwar kannte man in der Foucaultschen Messerschneidenmethode ein Verfahren, welches namentlich bei der Anfertigung von Hohlspiegeln Auskunft darüber gab, ob die hergestellte Spiegelfläche streng die Aufgabe erfüllte, daß alle parallel auffallenden Strahlen nach ein und demselben Punkte hin reflektiert wurden. Aber

einerseits ergab dieses Verfahren keine Auskunft über den Betrag der noch vorhandenen Fehler, andererseits war es an Objektiven, bei denen sich mit der sphärischen Abweichung noch der Farbenfehler vermischt, schwer anwendbar. Das große photographische Objektiv von 80 cm Durchmesser, welches im Jahre 1899 von der optischen Anstalt C. A. Steinheil Söhne dem Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam geliefert wurde, gab daher dem damals dort tätigen Astronomen J. Hartmann Veranlassung, eine neue Prüfungsmethode auszuarbeiten, welche mit Hilfe einiger photographischer Aufnahmen alle Eigenschaften und Fehler jeder Linse, jedes Spiegels und auch jedes zusammengesetzten optischen Apparates, z. B. eines Spektrographen, genau zahlenmäßig festzustellen gestattet. Dieses Prüfungsverfahren hat sich seither in der astronomischen Praxis wie auch in den optischen Werkstätten überall eingebürgert und von großem Nutzen erwiesen. Während früher der Astronom nur über die Unschärfe der Bilder eines Fernrohrs klagen konnte, gibt das neue Verfahren genau die Ursache der Unschärfe an und zeigt den Weg, wie dieselbe beseitigt und das Objektiv oder der Spiegel verbessert werden kann. Gerade hierdurch hat sich die Förderung der Technik durch den Astronomen wieder aufs deutlichste gezeigt.

Äquatoriale Montierung.

IV. Die Aufstellung der Fernrohre. Für den Gebrauch der Fernrohre sind, sobald sie gewisse Dimensionen überschreiten, besondere Aufstellungen — Montierung genannt — nötig, die sich wieder im wesentlichen nach zwei Richtungen hin unterscheiden. Soll das Fernrohr zur Beobachtung der Gestirne in allen Gegenden des Himmels dienen, so bedarf es einer Montierung, die ihm diese Beweglichkeit ermöglicht. Im allgemeinen kann das erreicht werden durch ein System von zwei Achsen, die senkrecht zueinander stehen; entweder gibt man einer davon die Richtung des Lotes, dann wird die andere bei Drehung des Instruments um die Vertikale die Ebene des Horizonts beschreiben, oder man stellt die eine der Achsen parallel der Erdachse und läßt die zweite sich in der Ebene des Äquators bewegen. In beiden Fällen wird es möglich sein, jeden Punkt des Himmels anzuvisieren. Die erstere Aufstellung nennt man die azimutale, die zweite die äquatoriale. Für große astronomische Instrumente pflegt man fast ausschließlich die letztere zu wählen, weil sie der scheinbaren täglichen Bewegung der Gestirne entspricht und es dadurch möglich wird, durch Benutzung eines Uhrwerks dem Fernrohr eine konstante Richtung im Raume zu erteilen, so daß ein in das Gesichtsfeld gebrachtes Gestirn auch dort an derselben Stelle stehen bleibt, während bei anderer Aufstellung der Beobachter selbst die Absehenslinie des Fernrohrs fortwährend dem Ortswechsel des Gestirns entsprechend nachbewegen muß.

Die Bedingungen, denen eine äquatoriale Fernrohraufstellung genügen muß, haben bei großen Instrumenten der Technik häufig recht schwierige Aufgaben gestellt. Dieselben sind in verschiedener Weise gelöst worden, und diese Montierungen sind häufig geradezu als technische Kunstwerke anzu-

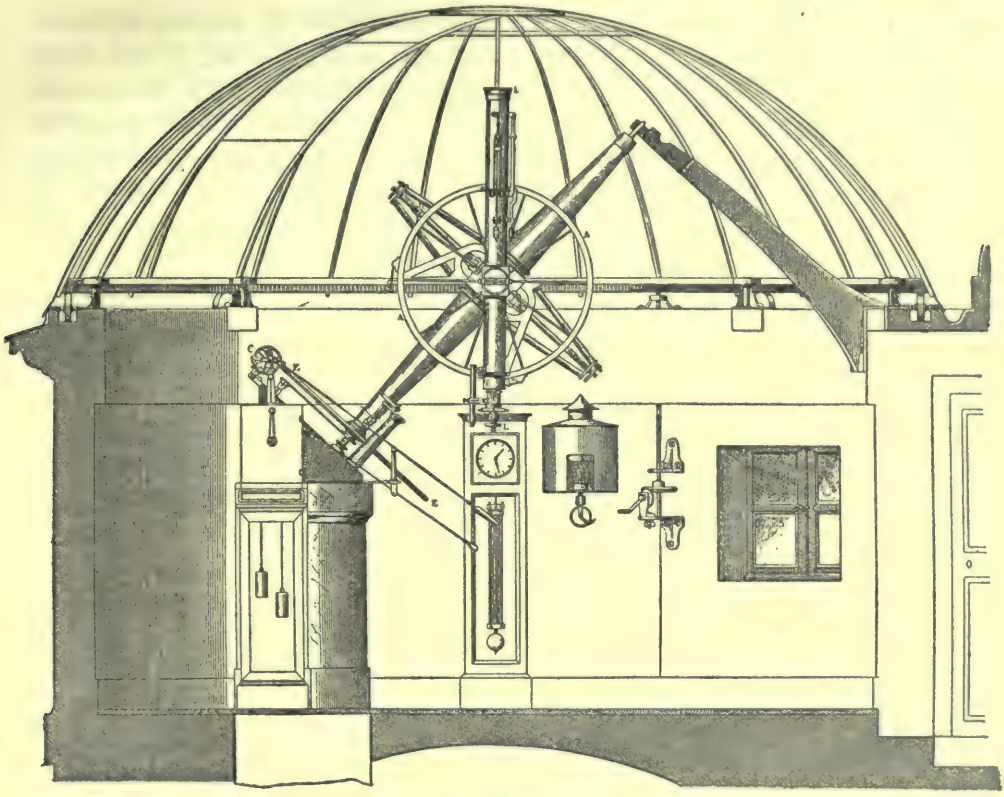


Fig. 39. Englisch montierter Refraktor.

sehen. Man pflegt dabei zwei durch die Anordnung und Lagerung der Achsen verschiedene Typen zu unterscheiden. Einmal hat man, um dem Fernrohr eine möglichst große Bewegungsfreiheit zu geben, die beiden Achsenzapfen voneinander getrennt und diese in je einem besonderen Lager gestützt. In dem die Achsenzapfen verbindenden Teile ist dann die Kippachse des Fernrohrs gelagert. In Fig. 39 ist eine solche Aufstellung dargestellt, man pflegt sie die „englische Montierung" zu nennen. Man bedarf dazu meist zweier Pfeiler, von denen der eine das obere, nach dem sichtbaren Pole des Himmels gerichtete Ende der Achse trägt, der andere den unteren Achsenzapfen aufnimmt.

Englische Montierung.

Die englische Aufstellung erscheint etwas umständlich und ist konstruktiv nicht mit der nämlichen Eleganz durchführbar wie die zweite, die die „Fraunhofersche" oder „deutsche" genannt wird. Diese ist im Laufe des letzten Jahrhunderts sowohl in Deutschland als auch in England und Amerika zu hoher Vollkommenheit ausgebildet worden. Tafel II zeigt eine der neusten dieser Aufstellungen, den großen Doppelrefraktor des Potsdamer Observatoriums, der im Jahre 1899 von der weltberühmten Hamburger Werkstätte von A. Repsold & Söhne vollendet wurde, die nach dem Tode ihrer Inhaber nun leider eingegangen ist. Die Aufstellung trägt in Potsdam zwei nebeneinander gelagerte Fernrohre von 50 bzw. 80 cm Öffnung und etwa 12 m Länge, von

Deutsche Montierung.

denen das erste für visuelle Beobachtungen, das zweite für photographische Aufnahmen des Himmels bestimmt ist. Auch die noch größeren, jedoch nicht doppelten Fernrohre des Lick-Observatoriums und dasjenige der Sternwarte an der Williamsbai bei Chicago, das von dem Amerikaner Yerkes gestiftet wurde, gehören in diese Kategorie, doch muß man trotz ihres äußerst zweckmäßigen Baues sagen, daß sie die Eleganz und kompendiöse Anordnung der Einzelteile — wenn man bei den riesigen Abmessungen sich so ausdrücken darf — der deutschen Instrumente nicht erreichen.

Der große Potsdamer Refraktor.

Wie die Abbildung des Potsdamer Refraktors deutlich erkennen läßt, ist die der Weltachse parallele Stundenachse am oberen Ende der senkrechten Säule in einer Büchse gelagert, die dieselbe ganz umfaßt und ihrerseits mit dem Kopf der Säule organisch verbunden ist. In einer zweiten Büchse, die wiederum mit der Stundenachse — an ihrem oberen Ende — verbunden ist, ist die Deklinationsachse gelagert. Das eine Ende dieser Achse trägt das Fernrohr selbst, indem ein starkes Mittelstück desselben auf deren Stirnfläche aufgeschraubt ist, das andere ein Gegengewicht.

Fernrohr und beide Achsen mit der Deklinationsbüchse stellen die beweglichen Teile der Montierung dar und können trotz ihres bedeutenden Gewichtes von ca. 140 Zentnern ganz bequem durch die Hand des Beobachters oder durch ein einfaches Uhrwerk in Bewegung gesetzt werden, welches rechts am Fuße der Säule zu sehen ist. Dazu ist es erforderlich, daß der Schwerpunkt dieses Massensystems genau in den Durchschnittspunkt der beiden Achsen fällt, also die Massen ganz gleichmäßig um denselben verteilt sein müssen. Das Fernrohr sitzt an dem einen Ende der Deklinationsachse, also muß am anderen Ende ein Gegengewicht angebracht sein. Um dieses so leicht wie möglich machen zu können, ist das Fernrohr so nahe wie nur angängig an den Schwerpunkt des Systems herangerückt und das Fernrohr ist deshalb vom Objektiv bis zum Okularende stetig verjüngt, im Gegensatz zu der früheren Gepflogenheit, an dem Mittelstück zwei, sowohl nach dem Objektiv als auch nach dem Okularende zu geringerem Durchmesser übergehende Teile anzusetzen.

Aber die mit der Stundenachse in deren Lagern sich drehenden Teile würden doch noch eine Reibung zu überwinden haben, die eine bequeme Bewegung ausschlössen. Deshalb sind alle beweglichen Massen durch eine Rolle unter dem gemeinsamen Schwerpunkt unterstützt, die um eine horizontale Achse drehbar auf dem höchsten Punkt ihrer Peripherie den bei weitem größten Teil der Last trägt und die ihrerseits mittels eines Hebelsystems durch ein im Innern der Säule hängendes Gewicht in die Höhe gepreßt wird, wodurch die fast völlige Entlastung der Lager der Stundenachse und eine sehr leichte Bewegung erreicht ist.

Alle Drehungen des Instruments müssen an Kreisen, die auf den beiden Achsen angebracht sind, genau meßbar sein. Dazu sind Mikroskope erforderlich, die wiederum für den Beobachter leicht zugänglich sein müssen; sie sind so angebracht, daß die Bewegungen des Fernrohrs an den beiden

Kreisen sowohl vom Okularende aus abgelesen werden können, als auch von dem Platze links am Fuße der Säule, wo sich die Handräder für die Bewegung des ganzen Instruments befinden. Der Strahlengang wird dadurch zwar kompliziert, aber die konstruierenden Mechaniker haben die Forderung in mustergültiger Weise gelöst. Alle Klemmungen des Instruments, alle Feinbewegungen können vom Okular aus betätigt werden.

Diese wenigen aus dem ganzen Mechanismus herausgegriffenen Angaben zeigen schon, wie eingehender Überlegung der Bau eines solchen Instruments bedarf. Und doch ist bei all diesem die äußere Form des ganzen Aufbaues eine äußerst elegante und auch das Auge des Künstlers befriedigende.

Kuppeln.

Dazu kommt weiterhin noch die Notwendigkeit, solche Instrumente gegen alle Unbilden der Witterung genügend zu schützen und dabei doch den freien Ausblick nach allen Punkten des Himmels zu ermöglichen. Zu diesem Zweck hat man große Kuppelbauten mit drehbaren Dächern nötig, die sich in geeigneter Weise leicht öffnen und schließen lassen und die bei einem Gewicht von Hunderten von Zentnern dem Druck der Hand folgen sollen oder die heutigentags mittels elektrischer Einrichtungen durch den Druck auf einen der Hand des Beobachters jederzeit leicht zugänglichen Hebel die gewünschte Bewegung automatisch ausführen. Tafel II zeigt die Innenseite der großen Potsdamer Kuppel. Das halbkugelförmige Dach besteht aus einer kunstvollen Eisenkonstruktion, die außen mit Eisenplatten, innen mit Holz abgedeckt ist; es hat, wie der Beobachtungsraum, 22 m Durchmesser, ein Gewicht von etwa 4000 Zentnern und ist trotzdem, dank seiner Lagerung auf 20 äußerst sorgfältig gearbeiteten Laufrädern sowohl mit der Hand als auch durch elektrischen Antrieb leicht drehbar. Ein 3,8 m breiter Spalt, der vom Horizont bis über den Zenit hinaus reicht, kann ebenfalls auf beide Arten geöffnet werden. Nach den jeweiligen Bedürfnissen und architektonischen Plänen können die Kuppeln zwar in mancherlei Formen ausgeführt werden, doch bleibt die Aufgabe, die sie zu erfüllen haben, immer dieselbe.

Beobachtungsstuhl.

Endlich muß auch bei den größeren Refraktoren noch dafür gesorgt werden, daß der Beobachter in allen Lagen des Instruments das Okularende erreichen kann, um von dort aus seine Beobachtungen vorzunehmen. Diesem Zwecke dienen bei kleineren Instrumenten bewegliche Leitern, bei größeren entweder ein eigener „Beobachtungsstuhl“, wie er in besonders kunstvoller Form auf Tafel II zu sehen ist, oder man macht auch den ganzen Fußboden des Beobachtungsraumes beweglich, so daß er je nach der Höhe des Okulars gehoben und gesenkt werden kann. Es ist an dieser Stelle natürlich nicht möglich, näher auf die ungeheuer vielen Konstruktionseinzelheiten einzugehen, aber die Darstellungen werden erkennen lassen, welch großer Aufwand an technischem Können allein es möglich macht, ein den Ansprüchen des Astronomen genügendes Werk zu schaffen.

Anforderungen anderer Art müssen wieder an den Bau und die Auf-

stellung von Fernrohren gestellt werden, die zu den fundamentalen Bestimmungen der Orte der Gestirne dienen sollen. Für sie ist die denkbar größte Stabilität, wenn auch bei beschränkter Bewegungsmöglichkeit, erste Bedingung. Hier braucht sich das Fernrohr nur in der Ebene des Meridians oder in einer anderen Vertikalebene zu bewegen. Seine Drehachse wird also so genau als möglich horizontal und für den Fall der Bewegung im Meridian von Osten nach Westen gelagert sein müssen. Ist die Vertikalebene nicht der Meridian, so tritt an die Stelle der Richtung Ost—West meist die Richtung Nord—Süd, während im übrigen alle Bedingungen dieselben bleiben.

Diese, unter dem Namen der Meridiankreise oder Durchgangsinstrumente in der astronomischen Beobachtungskunst benutzten Instrumente bedürfen, wie bemerkt, vor allem einer sehr festen und sicheren Aufstellung, so daß sich die Lage ihrer Drehachse zum Horizont und zum Meridian nicht ändern kann. Ebenso ist die Stabilität des Instrumentes in seinen einzelnen Teilen als hauptsächlichste Bedingung für zweckentsprechende Anwendung zu fordern. Demgemäß werden tiefe Fundamente, frei von allem Zusammenhang mit den übrigen Gebäuden zum Aufbau der steinernen oder eisernen Pfeiler, zwischen denen das Instrument in sicheren Lagern liegt, herzustellen sein.

Durchgangsinstrumente.

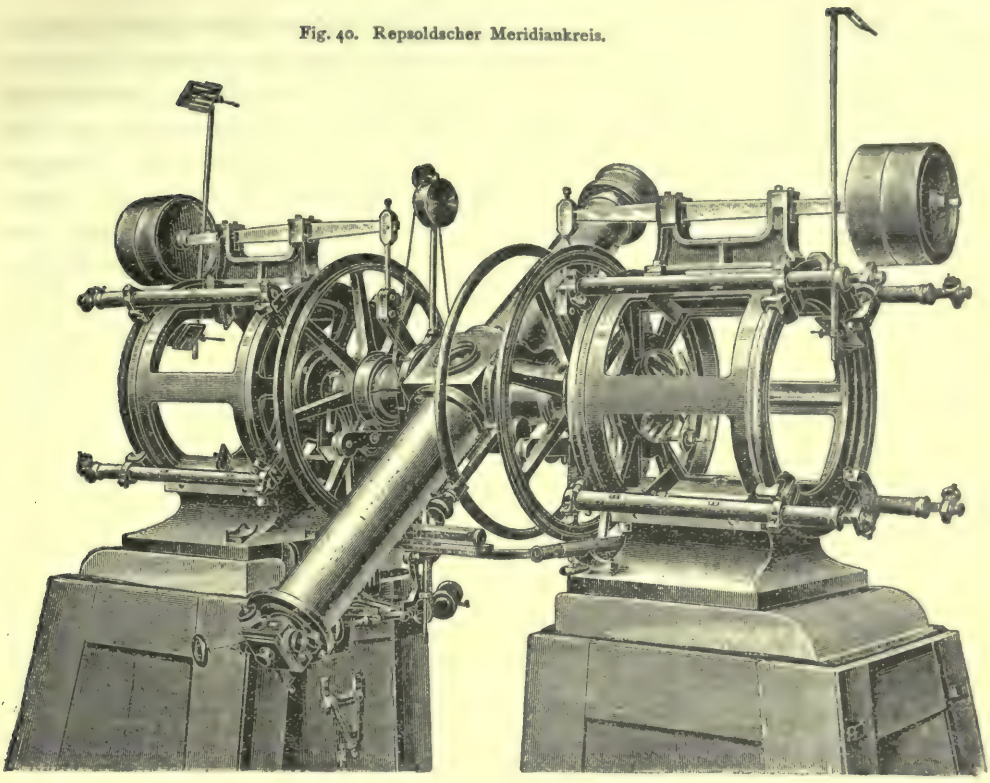
Außerdem ist es Aufgabe des Mechanikers, bei möglichst einfachem, übersichtlichem Bau des Instrumentes diesem eine zweckmäßige Form zu geben, seine Masse nicht größer zu machen, als für die Sicherheit der Konstruktion nötig ist, und nach gegenwärtigen Ansichten die vollkommenste Symmetrie, sowohl hinsichtlich des Meridianschnittes als auch mit Bezug auf die dazu senkrechten Ebenen, die durch das Zentrum des Instruments gehen, zu wahren.

Ein Meridiankreis besteht gegenwärtig immer aus einem Fernrohr von geeigneter, den Geldmitteln entsprechender Größe — zwischen 80 und 300 mm Öffnung und etwa dem 15- bis 18-fachen Betrag als Brennweite —, welches von einer senkrecht dazu stehenden starken Achse getragen wird. Letztere hat die Form zweier Kegelstümpfe, die sich zu beiden Seiten des als Würfel oder Kugel ausgebildeten Mittelstückes ansetzen und die an den beiden Enden in starke, zylindrische Stahlzapfen auslaufen, mit denen das Instrument in seinen Lagern ruht. Jede dieser Achsenhälften trägt einen Kreis, von denen mindestens einer mit feiner Gradteilung versehen ist, die bis auf Einheiten von fünf oder zwei Bogenminuten herabgeführt wird. An den Pfeilern sind vier bis sechs Mikroskope angebracht, die die Ablesung der Kreisteilung vermitteln, und zwar bis auf Zehntel Bogensekunden herab. Das Fernrohr ist in der Bildebene mit Einrichtungen — Fadennetz und Mikrometer — versehen, um den Moment des Durchgangs eines Sternes durch die Meridianebene mit einer Genauigkeit zu fixieren, die über den hundertsten Teil einer Zeitsekunde kaum in Zweifel lassen darf.

Repsoldscher Meridiankreis.

In Fig. 40 ist die Darstellung eines der großen Meridiankreise gegeben, wie sie in den letzten Jahrzehnten für mehrere Sternwarten in der Repsold-

Fig. 40. Repsoldscher Meridiankreis.



schen Werkstätte gebaut wurden; es ist die Abbildung des Instruments in Wien-Ottakring. An der Hand dieser Zeichnung möchte ich auf einige Einrichtungen hinweisen, die gerade geeignet sein dürften, einen Einblick zu gewähren in die durch die Praxis der astronomischen Beobachtungskunst bedingte sinnreiche und bis in die geringsten Einzelheiten durchdachte technische Ausführung.

Das Instrument steht zwischen zwei Pfeilern aus Ziegelsteinen, die auf einem zum besseren Austrocknen und rascheren Temperaturausgleich mehrfach durchbrochenen mächtigen Mauerblock aufgeführt sind. Sie tragen gußeiserne Aufsätze, die aus je zwei starken, untereinander durch Querstücke verbundenen Kreisen bestehen, welche an ihren inneren Seiten zur Aufnahme der Achsenlager und an ihren Rändern zum Befestigen der Mikroskope bestimmt sind. Diesen Aufsätzen gegenüber befinden sich die geteilten Kreise auf der Achse des Instruments. Das Fernrohr hat 123 mm Öffnung und 150 cm Brennweite. Das Objektiv und die gesamte Okulareinrichtung lassen sich leicht vertauschen, um dadurch einen etwa vorhandenen Einfluß der Durchbiegung des Fernrohrs auf die an den Kreisen abgelesenen Winkelgrößen aus zwei Beobachtungen zu eliminieren. Eine Reihe von Hilfsapparaten ist im Laufe der Zeit ersonnen worden, um die Abweichungen des Instruments von seiner idealen Gestalt und der streng richtigen Lage seiner Achse zu bestimmen. Dahin gehört zunächst eine äußerst empfindliche Libelle,

die mit zwei hakenförmigen Armen auf die Achsenzapfen gehängt wird, ferner die Umlegevorrichtung, die es ermöglicht, den Meridiankreis in seinen Lagern umzulegen, damit das vorher im Westen befindliche Achsenende dann nach Osten gerichtet ist. Unter der Mitte des Instruments ist eine Schale mit Quecksilber — ein sogenannter Quecksilberhorizont — aufgestellt, in dessen absolut horizontaler, spiegelnder Oberfläche die im Okular ausgespannten Fäden bei senkrechter Stellung des Fernrohrs reflektiert werden. Fällt der mittelste der Fäden des Horizontalsystems mit seinem Spiegelbild genau zusammen, so steht das Fernrohr oder richtiger die Linie horizontaler Mittelfaden—Mitte der Objektivlinse, genau vertikal, und am Kreise wird dann diejenige Ablesung gemacht werden, die der Lotrichtung entspricht. Kennt man diesen Punkt des Kreises, so kann der Winkel, den die Richtung der Lotlinie mit irgendeiner Visierlinie nach einem Stern bildet am Kreise bestimmt werden. Fällt auch das Bild des vertikalen Mittelfadens mit seinem Spiegelbild in beiden Lagen des Instruments genau zusammen, so liegt die Drehachse horizontal und die Absehenslinie des Fernrohrs steht senkrecht auf dieser Achse.

Andere Nebeneinrichtungen dienen dazu, das Gesichtsfeld des Fernrohrs bei Nacht zu beleuchten und neben den Sternen das im Okular angebrachte System feiner Spinnfäden dem Auge sichtbar zu machen, denn es sollen ja die Momente, in denen der sich durch das Gesichtsfeld bewegende Stern mit den einzelnen Fäden zusammentrifft, beobachtet werden. Diese Beleuchtung geschieht durch die Achse des Instrumentes hindurch, welche zu diesem Zwecke durchbohrt ist. Im Würfel befinden sich Prismen oder Spiegel, die das von der Seite kommende Licht nach dem Objektiv hin reflektieren; auf dessen Rückseite ist wiederum ein kleines Spiegelchen aufgekittet, von dem aus dann die Lichtstrahlen zentral zum Okular zurückgeworfen werden, oder die Rückfläche des Objektivs wird selbst zur Reflexion benutzt, um die Fäden dunkel im gleichmäßig hellen Felde erscheinen zu lassen. Sehr schwache Sterne würden aber in dem erleuchteten Gesichtsfelde verschwinden, deshalb ist noch Vorkehrung getroffen, daß ein Teil des Lichts auf ein Spiegelsystem am inneren Umkreise des Okularansatzes trifft, von wo die Strahlen die Fäden seitlich treffen, ohne in das Auge des Beobachters zu gelangen. Dann bleibt das Gesichtsfeld dunkel, und die Fäden erscheinen hell im dunklen Felde, so daß auch ganz schwache Sterne mit den mäßig hell erscheinenden Fäden in Vergleich gebracht werden können. Die Kreise haben je eine Teilung von 550 mm Durchmesser und sind in Intervalle von 2′ geteilt, so daß also nicht weniger als 10800 Striche in ganz genau gleichen Abständen voneinander gezogen werden mußten; sie können mit den an den eisernen Pfeileraufsätzen befindlichen, mit Schraubenmikrometern ausgerüsteten Mikroskopen auf Zehntelsekunden genau abgelesen werden.

Früher hat man die Pfeiler selbst bis zur Oberkante der Kreise geführt, so daß den Kreisen das Mauerwerk der Pfeiler gegenüber stand; dieses folgt aber den Temperaturschwankungen in anderer Weise wie das Metall der

Kreise, so daß dadurch ungleiche Erwärmung der letzteren eintreten konnte, wodurch wiederum deren Gestalt Veränderungen erleiden und die Intervalle zwischen den Teilstrichen ungleich werden mußten. Es würden dann die Fehlerbestimmungen dieser Striche, wie sie oben angedeutet wurden, nicht zutreffen. Die Masse der Kreise bedingt bei schwächerem Bau, wie sie die älteren Instrumente dieser Art aufweisen, eine Formveränderung, deshalb sind neuerdings jene sehr massiv gehalten, so daß derartige Fehlerquellen nicht zu befürchten sind.

Alle die vielen einzelnen Einrichtungen zur Bewegung und sicheren Feststellung des Instruments, die Hilfeeinrichtungen zur Bestimmung der Abweichungen von der idealen Lage und der Richtung seiner Absehenslinie zur Umdrehungsachse, können hier nicht mehr beschrieben werden, aber alle sind bis in das kleinste hinein in sinnreichster Weise konstruiert.

Beobachtungsraum.

Bei den für die genausten und wichtigsten Messungen des Astronomen bestimmten Durchgangsinstrumenten kommt besonders viel darauf an, daß die Gebäude, in denen derartige Apparate aufgestellt werden und die in erster Linie immer nur als Schutz gegen die Witterung während der Zeit der Nichtbenutzung zu denken sind, so beschaffen sind, daß sie durch ihr notwendiges Vorhandensein den Zweck des Instruments so wenig wie möglich stören. Also vor allem dürfen sie dem vollständigen Temperaturausgleich nicht hinderlich sein, und das bezieht sich sowohl auf die gleichmäßige Erwärmung des Instrumentes selbst als auch auf die dasselbe umgebenden Luftmassen, denn durch diese hindurch muß ja das Licht von den Gestirnen zum Instrument gelangen. Entstehen dort Temperaturschichtungen in unregelmäßiger Weise, so wird die Brechung der Lichtstrahlen nicht mehr so verlaufen, wie es die zu ihrer Berücksichtigung entworfenen Tafeln voraussetzen. Neuerdings baut man deshalb um den Meridiankreis oder das Durchgangsinstrument herum tonnenförmige Hallen, deren beide Hälften sich weit auseinander schieben lassen, so daß das Instrument selbst, während an ihm beobachtet wird, so gut wie völlig frei steht, jedenfalls aber auch die zunächst gelegenen Luftschichten durch das Dach soweit wie möglich in zur Achse des Instruments konzentrischer Weise durch Wärme und Strahlungsvorgänge beeinflußt werden.

Persönliche Gleichung bei Durchgangsbeobachtungen.

Von der Tätigkeit des beobachtenden Astronomen selbst ist bisher noch kaum die Rede gewesen, und doch ist diese natürlich, auch bei aller mechanischen Vollkommenheit seines Instruments, die Hauptsache; denn die Eindrücke, die während der Beobachtung seine Sinne, vor allem die Augen, das Gehör und neuerdings auch die motorischen Nerven, die eine durch diese Organe empfangene Wahrnehmung der Hand oder selbst dem Fuße mitteilen, kommen dabei in Betracht. Eine lange und gewissenhafte Schulung ist nötig, um bei diesen physiologischen und psychischen Vorgängen eine gewisse Sicherheit und Konstanz zwischen Ursache und Wirkung hervorzubringen.

Von besonderem Interesse dürften die Fortschritte sein, die man bezüglich der sicheren Auffassung der Koinzidenz zwischen dem bewegten

Stern und den Fäden im Gesichtsfelde gemacht hat. Es gilt bis auf Hundertel der Zeitsekunde den Moment des Zusammenfallens von Sternbild und Fäden festzustellen. Da hat es sich gezeigt, daß die verschiedenen Beobachter dasselbe Ereignis ganz verschieden auffassen, und diese Verschiedenheit, die sich sowohl auf die Schätzung des Ortes der Gestirne mit Bezug auf das Fadennetz als auch in Hinsicht der Zeit in verhältnismäßig weiten Grenzen verschieden erweist, macht natürlich die Resultate der einzelnen Beobachter, selbst am gleichen Instrument nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar. Die Unterschiede müssen bestimmt, in Rechnung gezogen oder auf mechanischem Wege möglichst vollständig ausgeschaltet werden. Diese Unterschiede stellen den Betrag dar, den man in der Astronomie die „persönliche Gleichung" nennt. Selbst die verschiedene Helligkeit der Gestirne bedingt kleine Unterschiede in der Auffassung von Ort und Zeit in dem angedeuteten Sinne.

Unpersönliches Mikrometer.

Namentlich die Fehlerquellen ersterer Art hat man seit etwa zwei Dezennien dadurch zu beseitigen versucht, daß der Beobachter nicht schätzt, wie weit bei einem bestimmten Sekundenschlag der Stern sich rechts oder links von einem Faden befindet, oder daß er in dem Moment der scheinbaren Koinzidenz mit der Hand ein Signal durch Schließung des elektrischen Stromes gibt, welches sich in Form von Punkten auf einem Papierstreifen darstellt, der außerdem noch die Zeichen aufnimmt, die eine gute Uhr jede Sekunde durch entsprechenden Kontakt veranlaßt, sondern, daß man den Faden selbst zugleich mit dem von ihm bisezierten Sternbildchen durch das Gesichtsfeld führt. Das geschieht entweder mit der Hand, die eine zur gleichförmigen Bewegung des Fadens dienende Schraube betätigt, oder auch wohl mit Zwischenschaltung eines Uhrwerkes. Eine auf der den Faden bewegenden Schraube sitzende Scheibe trägt am Rande eine Anzahl von Kontaktstiften, durch deren Berührung mit einer Feder beim Drehen der Schraube der elektrische Strom automatisch geschlossen wird und die Zeit der Signale so von der Hand des Beobachters und von seiner Schätzung des Ortes des Gestirnes im Gesichtsfeld in weitem Maße unabhängig wird. Dieses sogenannte „unpersönliche Mikrometer" wird jetzt zur scharfen Bestimmung von Durchgangszeiten fast überall benutzt und hat die Beobachtungsresultate tatsächlich ganz erheblich genauer und unabhängiger von den psychologischen Eigentümlichkeiten des Beobachters gemacht. Solche Einrichtungen sind gegenwärtig besonders auch im Gebrauch bei der Bestimmung der geographischen Längenunterschiede zwischen den Sternwarten und anderen für die Erdmessung wichtigen Orten. Wenn man bedenkt, daß in unseren Breiten einem Fehler in der Längendifferenz von einer Zeitsekunde eine lineare Strecke von etwa 300 m entspricht, daß man aber noch 5—10 m sicher verbürgen will, was bei Breitenbestimmungen keine allzu großen Schwierigkeiten hat, so muß schon ein Zeitfehler von ein bis zwei Hundertel der Sekunde vermieden werden. Das sind Anforderungen an die Beobachtungsgenauigkeit, die in gleichem Maße unter gleichen Umständen von keiner anderen Wissen-

schaft gefordert werden. Und allen diesen Bedingungen hat die Vervollkommnung der technischen Einrichtungen im Laufe der Zeit Rechnung tragen müssen.

Das photographische Fernrohr.

Eine ganz bedeutende Erweiterung hat das Gebiet der Astronomie mit der Anwendung der Spektroskopie und der Photographie auf die zölestische Forschung erfahren. Damit ist der früheren astronomischen Beobachtungstätigkeit ein neuer höchst bedeutungsvoller Zweig hinzugefügt worden, der sich mit der physikalischen Beschaffenheit der Himmelskörper befaßt und bei dem in vielen Fällen die photographische Platte an die Stelle der Wahrnehmung durch das Auge des Beobachters gesetzt wird. Es unterliegt keinem Zweifel, daß gegenwärtig durch die großen Fortschritte, die in dieser Beziehung der Bau höchst sinnreicher spektrographischer und photographischer Apparate gemacht hat, die in Verbindung mit den großen Refraktoren und Reflektoren neuster Konstruktion gebraucht werden, Erfahrungen gesammelt werden können, die tiefe Einblicke in die physische Beschaffenheit der Sternenwelt zu tun gestatten und die eben durch Zwischenschaltung der photographischen Platte es möglich machen, die darauf vom Lichtstrahl selbst verzeichneten Ergebnisse zu jeder Zeit erneuter Durchforschung und Deutung zu unterwerfen.

Der Unterschied zwischen dem einfachen Projektionsschirm, den schon Christoph Scheiner zu Beginn des 17. Jahrhunderts zum Auffangen des Sonnenbildes hinter dem Okular seines Fernrohres anwendete, und der ihm das Vorhandensein von dunklen Flecken auf der bis dahin als Sinnbild der Reinheit gedachten Sonnenscheibe anzeigte, bis zu den neusten photographischen und spektrographischen Aufnahmen, die auch wieder zunächst zu Forschungen auf der Sonne benutzt wurden, ist ein ungeheurer Schritt, und die mechanische Kunst hat der Astronomie außerordentlich feine Apparate schaffen müssen, damit diese den an sie gestellten Forderungen genügen konnte.

Ohne die großen Fortschritte, die in den letzten 30 Jahren die Photochemie in der Herstellung äußerst empfindlicher Platten gemacht hat, würden aber der astronomischen Photographie nicht so vorzügliche Aufnahmen der subtilsten Vorgänge auf der Sonne gelungen sein, wie sie heute durch unsere Instrumente zu erhalten sind. Konnte man früher eben wegen der geringen Empfindlichkeit der Platten nur an die photographische Aufnahme der Sonne herantreten, so sind heute sinnreiche Einrichtungen erforderlich, damit die Belichtungszeiten auf ganz kurze Zeitintervalle herabgedrückt werden können. Die Einrichtungen der sogenannten Momentverschlüsse spielen dabei eine große Rolle, da es vielfach nötig wird, die Dauer dieser Belichtungszeiten meßbar verändern zu können. Andererseits ist es auch erforderlich geworden, Belichtungszeiten von vielen Stunden anwenden zu können, um von Strahlenwirkungen, die von den feinsten Details der Nebelflecke und schwächsten Sterne zu uns gelangen, die zur Schwärzung der Platten notwendige aktinische Energie dem Silberkorne der Platte zuzuführen. Das bedingt eine äußerst genaue Nachführung des Fernrohres, dem die photographische Einrichtung angefügt ist, damit das Bild des Gestirnes für lange Zeit an derselben Stelle der photographischen Platte oder auf dem engen Spalt des Spektroskops

gehalten werden kann. Dazu ist einmal erforderlich, daß die Montierungen der großen Instrumente mit Uhrwerken versehen werden, die den, wie wir gesehen haben, meist sehr großen Massen der Fernrohre selbst eine äußerst gleichmäßige Bewegung zu erteilen vermögen, daß aber dazu auch für lange Expositionszeiten noch die Möglichkeit kommen muß, die Abweichungen der scheinbaren Sternbewegungen, wie sie durch Refraktion der Lichtstrahlen in der Luft und die Veränderungen, die das Instrumentensystem selbst durch die Schwerkraft in verschiedenen Lagen zum Horizont erleidet, ausgeglichen werden können. Das kann am besten dadurch geschehen, daß ein Beobachter mit Hilfe eines zweiten Fernrohres die Richtung des ersteren ständig überwacht. Deshalb hat man bei solchen Instrumenten neuerdings häufig zwei Fernrohre in unmittelbarer Verbindung miteinander angebracht, wie wir dies oben bei dem großen Potsdamer Refraktor sahen. Wo ein solches zweites Fernrohr nicht vorgesehen ist, benutzt man einen kleinen Teil des Gesichtsfeldes von dem zur photographischen Aufzeichnung dienenden Objektiv, um neben dem photographischen auch ein dem Auge sichtbares Bild zu erhalten, entweder indem man direkt neben der photographischen Platte ein Okular anbringt, oder indem man einen kleinen Ausschnitt aus dem allgemeinen Strahlenkegel um 90^0 ablenkt und so von der Seite her die Einstellung überwacht.

Die photographische Kamera ist im allgemeinen ja eine sehr einfache Einrichtung. Ganz wesentlich komplizierter wird der Apparat aber, wenn es sich um spektrographische Forschungen handelt. Es kann hier nicht auf die Einzelheiten dieser Apparate eingegangen werden, das ist auch bereits an anderer Stelle (S. 390f.) geschehen, sondern es soll nur darauf hingewiesen werden, zu welch weiteren umfangreichen Neukonstruktionen die Astronomie den Mechaniker veranlaßt hat. Die zuletzt erwähnten Apparate müssen in sehr weitgehendem Maße vor der Einwirkung der Temperaturänderungen während der oft stundenlangen Belichtungen geschützt werden. Zu diesem Zwecke schließt man sie in Hüllen ein, deren Temperatur auf elektrischem Wege automatisch konstant gehalten wird. Auch die stabile Anordnung der optischen und mechanischen Einzelteile, deren Zusammenwirken von höchster Bedeutung ist, muß für die verschiedenen Lagen, die ein solcher Spektrograph im Verlaufe der langen Expositionszeit gegen die Richtung der Schwerkraft einnimmt, gesichert sein.

Das moderne Spiegelteleskop.

Auch ganz neue Formen von Fernrohrmontierungen sind z. T. durch die Erfordernisse der Astrophysik notwendig geworden. Für die großen Reflektoren, wie sie neuerdings für photographische und spektrographische Himmelsforschungen verwendet werden, hätte man in Anlehnung an die Aufstellungen der Spiegelteleskope von Herschel, Lassell oder Lord Rosse die nötige freie und allseitige Beweglichkeit nicht erreichen können, wie sie für lange Expositionszeiten und dadurch bedingtes genaues Folgen der täglichen Bewegung nötig sind. Man mußte daher im Anschluß an die Fraunhoferschen Formen der parallaktischen Achsenstellung dem Umstande Rechnung zu tragen suchen, daß die Massenverteilung, sowohl der optischen als auch der übrigen

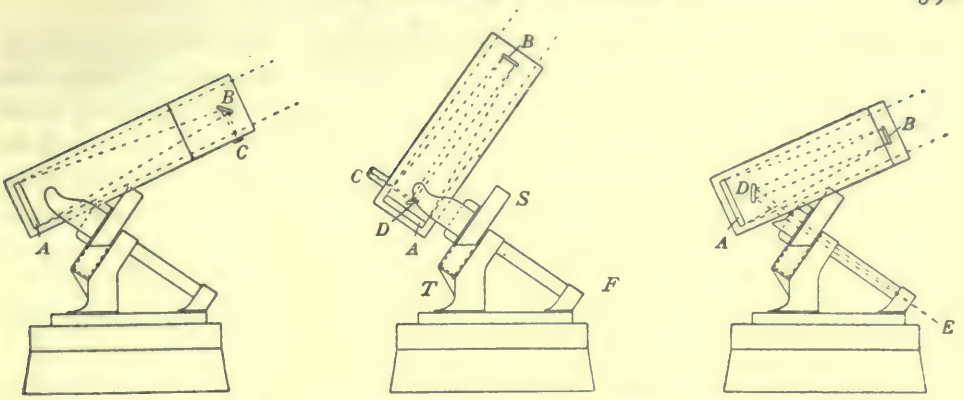


Fig. 41, 42, 43. Anwendungsformen des 60-zölligen Reflektors auf Mt. Wilson.

Teile der Instrumente, die ihren speziellen Zwecken dienen, eine andere geworden ist. Dadurch wird schon, wie z. B. beim Melbourner Teleskop, der Gesamtaufbau des Instrumentes erheblich variiert. Noch mehr aber bildeten sich bestimmte, aber bei weitem nicht so gleichmäßige Formen heraus bei den kurzbrennweitigen Reflektoren mit sehr großer Winkelöffnung, wie sie die für die photographischen Aufnahmen äußerst schwacher zölestischer Objekte nötige Lichtstärke besitzen. Um welche Formen und Dimensionen von Instrumenten es sich dabei handelt, möge hier kurz an dem Reflektor von $60_{\text{inches}} = 152$ cm Öffnung des Observatoriums auf Mount Wilson in Kalifornien gezeigt werden, der im Jahre 1909 vollendet wurde und damals das größte und lichtstärkste zur Himmelsbeobachtung dienende Instrument war; jetzt ist dasselbe schon durch den inzwischen nahezu vollendeten Spiegel von $100_{\text{inches}} = 254$ cm Öffnung auf derselben Sternwarte in Schatten gestellt. Der sechzigzöllige Reflektor kann in vier verschiedenen Formen verwendet werden, die in den Figuren 41, 42 und 43 veranschaulicht sind: erstens als Newtonsches Teleskop (Fig. 41) für photographische Aufnahmen im Fokus des Hauptspiegels *A*, der 7.6 m Brennweite hat; das Öffnungsverhältnis ist dann 1 : 5. Der (wie alle übrigen) auf der Vorderseite versilberte Glasspiegel ist parabolisch geschliffen, am Rande 194 mm, in der Mitte 175 mm dick und wiegt 865 kg. Die photographische Platte wird nicht direkt in die Bildebene des Hauptspiegels gebracht, sondern in der optischen Achse desselben ist zunächst der unter 45° geneigte Planspiegel *B* (368 : 502 mm) befestigt, der das Bild nach der Seite *C* reflektiert, wo die Kassette und die mit ihr verbundenen Okulare zum Halten des Sternbildchens montiert sind. Die zweite Verwendungsform ist die in Fig. 42 dargestellte als Cassegrainsches Teleskop. Statt des Planspiegels ist dann in *B* senkrecht zur optischen Achse ein hyperbolischer Konvexspiegel angebracht, der eine beträchtliche Verlängerung der Brennweite bewirkt und das Bild nach Reflexion vom Planspiegel *D* nahe am Hauptspiegel in *C* entwirft. Die dritte Verwendungsform ist der vorigen sehr ähnlich, nur wird in *B* ein anderer hyperbolischer Spiegel benutzt, der eine Gesamtbrennweite von 24.4 m, also ein Öffnungsverhältnis von 1 : 16 liefert; in dieser Form wird der Reflektor in Verbindung mit einem bei *C*

Das 60-zöllige Teleskop auf Mt. Wilson.

angesetzten großen Sternspektrographen verwendet. Die vierte, in Fig. 43 skizzierte Anordnung kann man als gebrochenes Cassegrain-Teleskop bezeichnen. In B befindet sich ein hyperbolischer Spiegel von 445 mm Durchmesser, der eine Gesamtbrennweite von 45.7 m erzeugt. Die von diesem Spiegel kommenden Lichtstrahlen werden in D von einem Planspiegel (318 : 565 mm), der im Kreuzungspunkte der optischen und der Stundenachse DE steht, in die Richtung der letzteren reflektiert: sie durchlaufen die hohle Achse und vereinigen sich erst hinter dem unteren Achsenlager, in einem tiefer gelegenen Beobachtungsraume, zum Bilde. In dieser Form wird das Teleskop mit sehr großen Spektrographen verbunden, die wegen ihrer starken Dispersion bedeutende Belichtungszeiten und daher auch besonders sorgfältige Konstanthaltung der Temperatur und Vermeidung von Biegungsfehlern erfordern.

Über die Montierung sei noch folgendes gesagt. Die Grundplatte F wiegt mit den beiden Achsenträgern 11532 kg. Die hohle Polarachse ist aus Nickelstahl hydraulisch geschmiedet; sie ist 4.6 m lang, 38 bis 46 cm dick und wiegt 4140 kg. Um bei dem großen Gewicht des Instruments doch eine leichte Drehung zu ermöglichen, genügte hier die oben beim Potsdamer Refraktor erwähnte Entlastungsrolle nicht, vielmehr wird hier der größte Teil des Gewichtes dadurch aufgehoben, daß man es auf Quecksilber schwimmen läßt. Die Stundenachse trägt nämlich an ihrem oberen Ende zunächst den hohlen Schwimmkörper S aus starkem Kesselblech, der eine Scheibe von 61 cm Dicke und 305 cm Durchmesser bildet und selbst wieder 3900 kg wiegt. Er taucht in den nur wenig weiteren gußeisernen Trog T, der 295 kg Quecksilber enthält. Durch den Auftrieb des durch den Schwimmer verdrängten Quecksilbers werden 19479 kg oder 95% des Gesamtgewichtes der beweglichen Teile des Teleskops getragen. Die Massen sind so verteilt, daß diese Entlastung senkrecht unter dem Schwerpunkt angreift. Nur der untere, den Hauptspiegel tragende Teil des Teleskops wird durch ein massives gußeisernes Rohrstück gebildet; der obere Teil, der nur die kleineren Spiegel zu tragen hat, ist in Form eines achteckigen Gerüstes aus Stahlrohren und geeigneten Verbindungsstücken leicht und trotzdem sehr fest gebaut. Das ganze Instrument macht trotz seiner kolossalen Dimensionen doch einen gefälligen Eindruck.

Gerade bei diesem Instrumente — und Ähnliches gilt auch von den anderen Apparaten auf Mount Wilson — zeigt sich die Einwirkung der Astronomie auf die Technik im hellsten Lichte. Der Erbauer desselben, Prof. Ritchey, war nämlich in einer Person der konstruierende Mechaniker und der Optiker, der den Schliff der Spiegelflächen in der höchsten Vollkommenheit ausführte, und gleichzeitig ist er der Astronom, der die prachtvollsten Himmelsaufnahmen mit diesem mächtigen Instrument hergestellt hat.

Die Heliostatenanlagen.

Gänzlich andere Montierungsformen haben sich endlich für die astrophysikalischen Instrumente herausgebildet, die vorzugsweise zur Beobachtung der Sonne dienen. Wegen der Fülle des Lichtes, die in diesem Falle zur

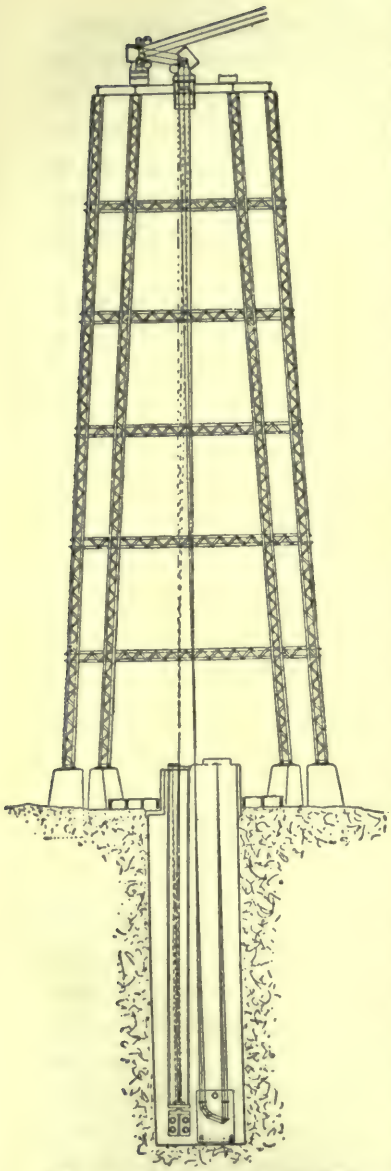


Fig. 44. 50 m-Turmteleskop auf Mt. Wilson.

Verfügung steht, können einerseits bei mäßiger Fernrohröffnung verhältnismäßig lange Brennweiten und ebenso bei den Spektralapparaten sehr starke Dispersionen angewandt werden; andererseits müssen die Apparate, die aus dem genannten Grunde sehr groß ausfallen werden, besonders vorsichtig vor der Erhitzung durch die Sonnenwärme geschützt und stabil aufgestellt werden. Alle diese Gründe haben dazu geführt, daß man für Sonnenbeobachtungen jetzt allgemein die unveränderlich feste Aufstellung des Fernrohrs und der damit vereinigten Hilfsapparate bevorzugt. Das Sonnenlicht wird dem Fernrohr dann durch einen oder zwei davor in geeigneter parallaktischer Montierung aufgestellte Spiegel — Heliostaten oder Zölostaten — zugeführt. Schon im Jahre 1874 haben deshalb H. C. Vogel und O. Lohse den Plan zu einer Heliostatenanlage entworfen, die dann auf dem Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam ausgeführt wurde und zu regelmäßigen Sonnenaufnahmen dient. Das 4 m lange Fernrohr liegt in der Richtung der Erdachse, das Objektiv nach unten, und vor diesem steht der in diesem Falle besonders einfache Heliostat. Potsdamer Heliostat.

Noch bequemer erwies sich für lange Brennweiten die horizontale Lagerung des Fernrohrs. In dieser Art ließ Prof. Hale, der jetzige Direktor des Mt. Wilson-Observatoriums, damals noch in der Werkstatt der Yerkes-Sternwarte bei Chicago zunächst das sogenannte Snow-Teleskop bauen, in welchem Konkavspiegel von 18 m und von 44 m Brennweite zur Entwerfung des Sonnenbildes benutzt werden können. Da sich bei dieser Anordnung die durch die Sonne ungleich erwärmten, horizontal übereinander liegenden Luftschichten besonders störend bemerklich machen, so ging Hale 1907 zu einer vertikalen Zölostatanlage, dem sogenannten Turmteleskop über. Zunächst erbaute er ein solches von 18 m Brennweite, dem, als es sich bewährt hatte, bereits 1910 des mächtige 50 m hohe Turmteleskop auf Mt. Wilson folgte. Fig. 44 zeigt eine Skizze des 18-m-Teleskopes. Ein etwa 18 m hoher Turm aus Eisenkonstruktion trägt in der Mitte seiner oberen Plattform ein horizontal liegendes Objektiv von 18 m Brennweite und 30.5 cm Öffnung, welches sein Licht von einem darüber drehbar aufgestellten elliptischen Planspiegel von 32 : 56 cm Durchmesser empfängt. Der eigentliche, Snow-Teleskop. Turmteleskop.

durch ein Uhrwerk bewegte Zölostatenspiegel ist seitlich davon auf Schienen fahrbar aufgestellt und kann der wechselnden Deklination der Sonne entsprechend jedesmal in die günstigste Lage gebracht werden. Dieser Spiegel ist rund und hat 43.2 cm Durchmesser. In Verbindung mit diesem Turmteleskop finden zwei mächtige Spektralapparate Verwendung, die zur Erzielung konstanter Temperatur in einem 10 m tiefen Schacht unterirdisch aufgestellt sind. Bei dem neuen 50 m-Turmteleskop ist der Schacht 25 m tief.

Schönheitsformen bei den neueren Instrumenten.

Oben sahen wir, wie noch zur Zeit des Hevelius, also in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts, die astronomischen Meßinstrumente mit reichen, kunstvollen Verzierungen überladen waren. Mit dem Einsetzen der Bradleyschen Zeit und durch dessen Streben nach höchster Genauigkeit verschwinden diese Instrumente aus den Sternwarten, und das reine Zweckmäßigkeitsprinzip gelangt nach und nach zur vollen Herrschaft. Das schließt aber durchaus nicht aus, daß die Erbauer der astronomischen und geodätischen Instrumente doch immer bestrebt gewesen sind, mit diesem Prinzip auch eine gefällige und im ganzen gewissen ästhetischen Anforderungen entsprechende Form für ihre Werke anzustreben. Die Instrumente von Fraunhofer, Reichenbach und neuerdings die aus der Repsoldschen Werkstätte, um hier nur einige der bekanntesten Feinmechaniker zu nennen, haben oft ein so gefälliges und konstruktiv durchdachtes Äußere, daß man manchmal versucht ist anzunehmen, daß bei dieser äußeren scheinbaren Einfachheit kaum den Bedingungen an größte Stabilität, wie sie oben allgemein als für astronomische Instrumente nötig erwähnt wurde, genügt werden könne. Aber trotzdem geben diese Instrumente zu keinerlei Klagen Anlaß.

Diesem Bestreben, äußere Eleganz mit zweckmäßiger Ausführung der wesentlichsten Teile zu verbinden, haben die etwa um die Mitte des vorigen Jahrhunderts in die astronomische Forschung eintretenden Amerikaner nicht in gleichem Maße ihr Augenmerk zugewendet, wie das in Europa und da besonders in Deutschland, England und Frankreich geschieht. Bei den großen Dimensionen, die den meist aus privaten Mitteln beschafften Instrumenten gegeben werden konnten, wurden dort in erster Linie die optischen Teile möglichst vollkommen ausgeführt und die Konstruktion der Aufstellungen nur insoweit, als es eben zur Erfüllung des Zweckes der Instrumente nötig erschien, durchgebildet. Wenn man sich dabei auch meist an die traditionellen Formen Fraunhofers und seiner Zeitgenossen anlehnte, so hat man doch vielfach die einzelnen Teile der Montierungen nur so weit feiner bearbeitet, als es dringend nötig war. Man hat aus Zweckmäßigkeitsgründen mehrfach die äußere Harmonie der Formen geopfert, um z. B. die Beleuchtung eines Kreises oder seine Ablesung zu erleichtern. Die Massen der Konstruktionsteile sind mehrfach erheblich größer, als es dringend nötig wäre, Säulen und Achsen sowie die Kreise ohne viel Rücksicht auf äußere Form angeordnet und dimensioniert.

Es kann aber doch nicht gesagt werden, daß dadurch ein besseres oder

stabileres Instrument zustande gekommen sei, und wir empfinden unwillkürlich den Unterschied der beiderseitigen Konstruktionsverfahren.

V. Die Sternwartenanlagen. Nicht nur bei dem Bau der Instrumente selbst hat man diese Schönheitsrücksichten, wenigstens zunächst in der alten Welt und erst in den letzten Dezennien auch jenseit des Ozeans, zur Geltung zu bringen versucht, sondern man hat auch dem Bau der Observatorien selbst außer ihrer beobachtungstechnisch zweckmäßigen Ausgestaltung, Anordnungen und Formen zu geben gesucht, die auch architektonischen Ansprüchen, soweit es sich mit den wesentlichen Zwecken derselben vereinigen läßt, gerecht werden. Die Sternwarten.

Aus beiden Bedingungen heraus haben sich im Laufe der letzten 100 Jahre die Aufstellungen der zu genauen Messungen dienenden astronomischen Instrumente von den früher allein als wünschenswert erachteten hohen Türmen emanzipiert und sind, der Forderung größter Stabilität folgend, zu den sicheren, sich wenig über den Erdboden erhebenden Pfeilerbauten übergegangen. Dadurch sind selbstverständlich auch die äußeren Verbindungen zwischen den eigentlichen Beobachtungsräumen und denjenigen, welche dem Beobachter als Wohnung und Arbeitszimmer dienen, ganz andere geworden. Ohne auf die jetzt allseitig aufgegebenen übereinanderliegenden Zimmer mit dem den Bau krönenden Instrumentenraum zurückzukommen, muß auf die noch gegenwärtig nicht ganz zur Entscheidung gelangte Frage der Raumverteilung beim Bau einer größeren Sternwarte doch etwas näher eingegangen werden, da von der Entscheidung darüber auch die architektonische Ausgestaltung der wesentlichen Bauten in mancher Beziehung abhängt.

Es handelt sich dabei darum, ob man die Beobachtungsräume organisch in das ganze Gebäude mit eingliedert, was sich aus Gründen der Bequemlichkeit und leichten Erreichbarkeit bei den nächtlichen Arbeiten empfiehlt, oder ob man eine völlige Trennung der eigentlichen Beobachtungsräume von den Wohn- und Arbeitsräumen wählen soll, zu denen in erster Linie hier die Zimmer für die Rechner, Bibliothek und Sammlungsräume, sowie etwa nötige Laboratorien zu rechnen sind. Im allgemeinen neigt sich die Ansicht der praktischen Astronomen heute der letzteren Anordnung zu, da man dabei der Eigenart der einzelnen Instrumentengattungen bei weitem am besten Rechnung tragen kann, und außerdem die Beobachtungsresultate von dem Einfluß der Wärmestrahlung, der Rauchentwicklung, wie sie bei bewohnten Gebäuden doch unvermeidlich ist, so weit wie möglich unabhängig erhält. Es kann die Anordnung und Lage der einzelnen Beobachtungshäuser zum Hauptgebäude so getroffen werden, daß die vorherrschende Windrichtung die von dem letzteren ausgehenden Störungen erheblich abschwächt, es kann weiterhin auch der manchmal wünschenswerten gegenseitigen Ergänzung zweier Instrumente genügt werden, indem beide z. B. im gleichen Meridian oder demselben Parallel aufgestellt werden. Die Kuppelbauten für

Instrumente, die allseitig möglichst freien Horizont beanspruchen, können an höher gelegene Punkte des Gesamtgeländes gelegt werden, so daß ihr Aufstellungspunkt die anderen Baulichkeiten überragt.

Die bei dieser Anordnung auftretende Unannehmlichkeit liegt im wesentlichen nur in der geforderten bedeutenderen Ausdehnung des benötigten Geländes und in der weniger bequemen Verbindung der einzelnen Gebäude, die sich bei den nächtlichen Arbeiten oder bei stürmischem Wetter unangenehm bemerkbar macht. Nach dem älteren, zusammenhängenden System ist z. B. die vor 100 Jahren vollendete Göttinger Sternwarte angelegt, sowie die in den 70er Jahren erbauten großen Observatorien in Wien und Potsdam, alles Gebäude von monumentaler Schönheit. Zwischenstufen stellen etwa die Sternwarten in Pulkowa, Algier und in kleinerem Maßstabe diejenige in Leipzig dar, bei denen man in langgestreckter, meist Ost-West gerichteter Anordnung Beobachtungs-, Arbeits- und Wohnräume mehr oder weniger symmetrisch nebeneinander gestellt und sie untereinander durch kurze Gänge in direkte Verbindung gesetzt hat. Dabei ist namentlich für die Meridianinstrumente auf eine freie Sichtlinie in meridionaler Richtung das Hauptaugenmerk gelegt worden.

Bei späterer Aufstellung neuer Instrumente hat man aber dann, wie z. B. auch in Potsdam, von den bis dahin bestehenden Räumlichkeiten unabhängige Kuppelbauten und Räume für Durchgangsinstrumente erbaut und sich damit dem zuletzt genannten Sternwartentyp angeschlossen. Sternwarten, welche von vornherein in ihrer gesamten Anlage auf breitem Geländeausmaß die volle Trennung der Einzelbauten durchführten, sind diejenigen von Straßburg, Nizza, auf dem Königsstuhl bei Heidelberg und ganz neuerdings in Bergedorf bei Hamburg und die neue Berliner Sternwarte in Neu-Babelsberg.

Die Obervatorien der ersteren Art boten natürlich dem Architekten bei seinen künstlerischen Bestrebungen ein wesentlich günstigeres Objekt dar, wenn sich auch dabei die Forderungen des astronomischen Beobachters nicht immer leicht mit denen des Künstlers in Einklang bringen ließen. Aber auch die schönen Kuppelbauten und gut dimensionierten Meridianbauten der Nizzaer und Straßburger Sternwarte, diejenigen der großen amerikanischen Observatorien auf dem Mount Hamilton und an anderen Orten sowie die zuletzt genannten beiden deutschen Neuanlagen haben Gelegenheit gegeben, den durchaus zweckmäßigen Beobachtungsräumen eine architektonisch gut durchgeführte äußere Form zu schaffen. Bei diesem Einzelhüttensystem fällt auch dem Landschaftsgärtner eine wichtige Aufgabe zu, indem er durch passende Bepflanzung und geschickte Anlage der Verbindungswege die vielen Einzelhäuser zu einem einheitlichen Ganzen zusammenfassen und so bei aller Zweckmäßigkeit doch auch einen dem Auge gefälligen Anblick schaffen kann. Überhaupt empfiehlt es sich, das Gelände in der Umgebung der Sternwarten möglichst weitgehend mit niedrigem Buschwerk zu bepflanzen, da hierdurch die Erhitzung des Bodens an sonnigen Tagen, die eine starke Luftunruhe zur Folge hat, verhütet wird.

Literatur.

Von Beschreibungen älterer Instrumente seien hier erwähnt: TYCHO BRAHE, Astronomiae instauratae mechanica (Wandesburgi 1598). — JOHANNES HEVELIUS, Machinae coelestis pars prior (Gedani 1673). — FIORINI-GÜNTHER, Erd- und Himmelsgloben (Leipzig 1895, Teubner). — GEORG THIELE, Antike Himmelsbilder (Berlin 1898, Weidmann), besonders über den Farnesischen Atlas. — H. DIELS, Antike Technik, 2. Aufl. (Leipzig 1920, Teubner). — EILHARD WIEDEMANN, Über die Uhren im Bereich der islamischen Kultur (Halle, 1915 Nova Acta). — J. HARTMANN, Die astronomischen Instrumente des Kardinals Nikolaus Cusanus (Berlin 1919, Weidmann).

Von zusammenhängenden Werken kommen in erster Linie in Betracht:

L. AMBRONN, Handbuch der astronomischen Instrumentenkunde (Berlin 1899, Springer).

JOH. A. REPSOLD, Zur Geschichte der astronomischen Meßwerkzeuge (Leipzig 1908 u. 1914, Engelmann).

DIE GRAVITATION.

Von

S. Oppenheim.

Newtons Principia.

I. Das Newtonsche Gesetz. Wenn die Aufgabe eines jeden Naturerkennens darin besteht, alle beobachteten und noch zu beobachtenden Erscheinungen auf ein einziges einheitliches Gesetz zurückzuführen, das uns befähigt, zukünftige Erfahrungen vorauszusehen, um nach dieser Voraussicht unser gegenwärtiges Handeln einrichten zu können, so steht unter allen wissenschaftlichen Disziplinen die theoretische Astronomie oder, wie besser gesagt werden sollte, die Mechanik des Himmels diesem wissenschaftlichen Ideal am nächsten. Durch die Newtonsche Entdeckung der allgemeinen Gravitation und des Gesetzes ihrer Wirksamkeit wurde ihr die dazu notwendige Grundlage gegeben, und schon Newton selbst erkannte ihre Tragweite. Es gelang ihm in seinem Hauptwerke: Philosophiae naturalis principia mathematica, London 1687, gewissermaßen mit einem Schlage, eine staunenswerte Menge scheinbar gar nicht miteinander zusammenhängender Erscheinungen diesem Gesetze unterzuordnen und die sich daran anschließenden Aufgaben, soweit sein mathematisches Können reichte, zu lösen.

Planeten und Monde.

An erster Stelle war es natürlich das Problem der Bewegung der Planeten und ihrer Monde am Himmel, dem er seine Kräfte widmete. Seit den ältesten Zeiten galt gerade dieses den Menschen als ein sehr schwieriges Rätsel, und an seiner Lösung hat sich ihr erstes wissenschaftliches Bestreben versucht, das mit den Namen Aristarch, Hipparch, Ptolemäus und Kopernikus verbunden erst in der Aufstellung der empirischen Gesetze dieser Bewegungen durch Kepler seinen Abschluß fand. Diese — als Ausdruck der regelmäßigen (ungestörten) Bewegungen der Planeten und ihrer Monde — konnte er erklären durch die Annahme, daß die anziehende Kraft der Sonne allein den Lauf der Planeten, und die der Planeten wieder den ihrer Monde regle. Gleicherweise führte er die vielfachen Anomalien in ihren Bewegungen, wie die retrograden Verschiebungen der Knoten der Bahn, die progressiven ihrer Apsiden, sowie die vielen sonstigen Ungleichheiten namentlich im Laufe des Erdmondes, die teils schon im Altertum bekannt waren, teils erst im Mittelalter von den Arabern, dann von Kopernikus, Tycho und Kepler neu aufgefunden wurden, auf das gleiche Prinzip zurück, sich aber hier auf den allgemeinen Gedanken stützend, daß die gegenseitige Anziehung aller die treibende Ursache ist, die ihre Bewegung beeinflußt. Ebenso ge-

lang ihm für die seltsamen Körper, die hie und da am Himmel als Kometen auftauchen, der gleiche Nachweis, daß sie in ihrer Bewegung derselben Kraft unterworfen sind, und seinem Schüler Halley glückte daraufhin die bedeutsame Entdeckung des ersten periodischen Kometen, der wie ein Planet eine elliptische Bahn um die Sonne beschreibt. Kometen.

In gleicher Art auf Grund desselben Prinzips der allgemeinen Gravitation behandelte er das Problem der Gestalt der Erde. Er zeigte, wie ihre Abplattung sich aus ihrer Rotation und der durch sie verursachten Fliehkraft berechnen läßt, wie infolge derselben Kraft die Schwere auf ihrer Oberfläche variiert, eine Frage, zu der die damals zuerst von Richer beobachtete Tatsache, daß ein für Paris reguliertes Sekundenpendel bei seiner Übertragung nach Cayenne verkürzt werden mußte, die Veranlassung bot. In seiner und seiner Nachfolger Hand gestaltete sich gerade dieses seither unter dem Namen der Theorie der Gleichgewichtsfiguren rotierender Flüssigkeitsmassen bekannte Problem zu einem, das in intensiver Weise die Mathematiker beschäftigte und in bedeutsamer Weise zur Entwicklung der Mathematik beitrug. Gestalt der Erde.

Er löste das Rätsel des Ebbe- und Flutphänomens durch die Annahme, daß die beweglichen Wassermassen auf der Erdoberfläche der anziehenden Wirkung von Mond und Sonne gehorchen, und ebenso endlich das zweitausendjährige Geheimnis der Präzession, die ihm als Wirkung der Anziehung erscheint, die die vereinigte Kraft von Mond und Sonne auf den äquatorealen Wulst der Erde ausübt. Ebbe und Flut. Präzession.

Aber noch mehr. Die Herschelsche Entdeckung der Doppelsterne (1803) und der Tatsache, daß ihre Glieder Bahnen umeinander beschreiben, führte zu der Frage nach den Gesetzen, denen diese Bewegungen gehorchen, und den Kräften, unter deren Einwirkung sie erfolgen. Die Forderung, daß sie mit der Newtonschen Gravitationskraft identisch sind, erwies sich als stets zureichend, und seitdem bildet das Problem der Bestimmung der Bahnen dieser Sterne, die Vorausberechnung ihrer gegenseitigen Lage unter der Voraussetzung, daß die zwischen ihnen tätige Kraft mit der Newtonschen Gravitation identisch ist, einen neuen wichtigen und auch interessanten Zweig der theoretischen Astronomie, dem sie mannigfache neue und merkwürdige Erfolge verdankt. Unter anderen die Entdeckung der spektroskopischen Doppelsterne, d. i. solcher Sternenpaare, die so eng aneinander stehen, daß sie bisher noch nicht visuell voneinander getrennt werden konnten, ihre Doppelnatur vielmehr bloß aus dem periodischen Auf- und Abschwanken ihrer nach dem Dopplerschen Prinzip gemessenen Radialgeschwindigkeiten zu erkennen ist. Ebenso die Entdeckung einer Gruppe optisch veränderlicher Sterne, deren genauere photometrische Beobachtung zu der Hypothese führte, daß der Verlauf ihres Lichtwechsels durch die Bewegung zweier verschieden heller oder verschieden großer Körper umeinander hervorgerufen werde, die zeitweise nebeneinander stehen und so den Eindruck eines Helligkeitsmaximums hervorrufen, zeitweise sich zum Teile bedecken Doppelsterne.

und dann ein Minimum an Helligkeit dem beobachtenden Auge darbieten. In der Tat brachten dann auch die spektroskopischen Beobachtungen eine Bestätigung ihrer Doppelnatur.

Die universelle Gültigkeit der Newtonschen Gravitation.

Damit erscheint die universelle Gültigkeit der Newtonschen Gravitation erwiesen. Ihre Wirksamkeit beschränkt sich nicht mehr einzig auf die Körper des Sonnensystems, sondern reicht weit hinaus in die fernen Räume der Fixsternwelt, so weit als bisher die Beobachtungskunst der Astronomen vordringen konnte. Unter ihrer Herrschaft schweben und bewegen sich die einzelnen Himmelskörper im unermeßlichen Raume. Verglichen mit den ungeheuren Entfernungen zwischen ihnen, sind sie alle, die großen wie die kleinen, nur wie Stäubchen von Materie zu betrachten. Trotzdem fesselt sie diese Kraft wie ein unsichtbares Band aneinander und hält sie in gegenseitiger Abhängigkeit. Einzig die Frage ist noch als unerledigt zu betrachten, ob auch eine gegenseitige Einwirkung zwischen den Fixsternen und unserem Sonnensystem vorhanden und aus den Beobachtungen konstatierbar ist.

Kant und die Newtonsche Gravitation.

So erscheint es erklärlich, daß Kant im Staunen vor dieser bewunderungswürdigen Anordnung des Weltgebäudes die Worte ausspricht: „Gebt mir Materie, ich will euch zeigen, wie eine Welt daraus entsteht. Denn wenn Materie vorhanden ist, welche mit einer wesentlichen Attraktionskraft begabt ist, so ist es nicht schwer, diejenigen Ursachen zu bestimmen, die zu der Einrichtung des Weltsystems im Großen betrachtet haben beitragen können. Man weiß, was dazu gehört, daß ein Körper eine kugelrunde Figur erlange, man begreift, was erfordert wird, daß freischwebende Kugeln eine kreisförmige Bewegung um den Mittelpunkt anstellen, gegen den sie gezogen werden."

Ebenso erscheint es uns verständlich, wenn Kant auseinandersetzt, daß das Gesetz für die Wirkungsweise dieser Kraft schon mit unserer ganzen Raumauffassung zusammenhänge, in ihr begründet sei und so streng genommen ein aprioristisches Erkenntnisresultat bedeute. Hier ist, sagt er, Natur, die auf Gesetzen beruht, welche der Verstand a priori erkennt, und zwar vornehmlich aus allgemeinen Prinzipien der Bestimmung des Raumes.

Ist nun diese Anschauung gerechtfertigt, oder ist im Gegenteil das Newtonsche Gesetz doch nichts anderes als ein empirisches Gesetz, das nach dem Stande unseres Wissens etwa schon einer Korrektur bedürftig ist? Wohl unterliegt es keinem Zweifel, daß es bis zu einem sehr hohen Grade der Genauigkeit den tatsächlichen Verhältnissen entspricht. Aber die Frage ist, genügt es ihnen in voller Strenge und kommt ihm deshalb tatsächlich jener Grad der Sicherheit und Gewißheit zu wie den Axiomen der Mathematik oder, um nochmals einen Ausspruch Kants zu zitieren: Könnte nicht ein anderes Gesetz der Attraktion als das des umgekehrten Quadratverhältnisses der Entfernungen zu einem Weltsystem als schicklich erdacht werden?

Genauigkeit des Newtonschen Gesetzes.

II. Die Prüfung des Newtonschen Gesetzes. Um den Grad der Genauigkeit festzustellen, mit der das Newtonsche Gesetz die Bewegungen

der Planeten und ihrer Monde, der Kometen, der Doppelsterne, namentlich aber des Erdmondes darstellt, wäre eine Vergleichung aller am Himmel durchgeführten Ortsbestimmungen mit der Theorie durchzuführen. Ein Riesenaufwand an Zeit und Arbeit ist dazu erforderlich, selbst wenn man die Beobachtungen so weit einschränkt, daß man nur jene benutzt, die seit dem Jahre 1750, dem Beginne der Beobachtungstätigkeit Bradleys, durchgeführt wurden, die vor diesem Jahre angestellten aber als den modernen Ansprüchen an Genauigkeit zu wenig genügend verwirft.

In neuerer Zeit ist von jenen, die eine solche Riesenarbeit unternahmen und sie auch vollendeten, Leverrier in Paris zu nennen. Die von ihm berechneten Tafeln der Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn genießen noch heute hohen Ruhm und bilden die Grundlage für viele theoretische Untersuchungen. In jüngster Zeit (1895) hat Newcomb für die vier inneren Planeten die Arbeit wiederholt. Über 72000 Positionsbestimmungen derselben, welche von 1750—1890 reichen, wurden streng reduziert, von allen ihnen möglicherweise anhaftenden systematischen Fehlern befreit und sodann mit den Leverrierschen Tafeln verglichen.

Die vier inneren Planeten.

Das Ergebnis dieser umfassenden Rechnungen läßt sich dahin aussprechen, daß alle Beobachtungen mit den Resultaten der Gravitationstheorie übereinstimmen bis auf die folgenden größeren Fehler:

1. Merkur eine säkulare Störung in der Länge seines Perihels im Betrage von $41'' \pm 2''$ für ein Jahrhundert, was so zu verstehen ist, daß die empirisch bestimmte Säkularvariation des Perihels um $41''$ in einem Jahrhundert größer ist als die rein nach der Newtonschen Theorie berechnete,

2. Venus eine säkulare Störung in der Knotenlänge ihrer Bahn in der Größe von $10''$ in einem Jahrhundert, mit einer möglichen Unsicherheit von $\pm 4''$,

3. Mars eine säkulare Störung in seiner Perihellänge von $8''$ für ein Jahrhundert mit einem mittleren Fehler von $\pm 3''.5$.

Von diesen Abweichungen zwischen Theorie und Beobachtung ist die in der Länge des Merkurperihels die größte. Sie war auch schon Leverrier bekannt, aber ihrer absoluten Größe nach noch nicht mit der Genauigkeit wie nunmehr seit der Diskussion Newcombs.

Die vier äußeren Planeten.

Die Theorien von Jupiter und Saturn bieten der Rechnung wegen der größeren Masse beider, wie wegen der genäherten Kommensurabilität ihrer Umlaufszeiten und daher wegen der beträchtlichen Störungen, die sie aufeinander ausüben, ziemliche Schwierigkeiten. Trotzdem ist der Erfolg der Berechnungen Leverriers, 1876, und der neueren G. W. Hills, 1895, ein glänzender. Die Unterschiede zwischen Beobachtung und Rechnung überschreiten selten mehr als $3''$ in Länge für die älteren 1750—1825 und $1''$ für die neueren Beobachtungen des Zeitraumes 1825—1890.

Entdeckung des Neptun.

Dagegen fand Bouvard, der 1820 auf Veranlassung von Laplace die Bahnbestimmung des erst 1781 von Herschel entdeckten Planeten Uranus übernommen hatte, daß sich für alle Beobachtungen des Zeitraumes 1781

bis 1820, zu denen außerdem einzelne ältere Ortsbestimmungen des Planeten hinzukamen, in denen er noch als Fixstern beobachtet erscheint, nämlich 1753 von Bradley, 1756 von Tobias Mayer und 1763—1768 von Lemonnier, kein einheitliches Elementensystem berechnen lasse. Er verwarf daher die älteren Beobachtungen und gründete seine Tafeln bloß auf die der Jahre 1780—1821. Indes schon wenige Jahre nach deren Erscheinen zeigten sich ziemlich bedeutende Unterschiede zwischen Beobachtung und Rechnung. Im Jahre 1830 stiegen sie auf 20″, 1840 auf 90″, 1844 auf 120″. Die wahrscheinliche Ursache dieser stetig zunehmenden Fehler dürfte von den Astronomen lebhaft diskutiert worden sein. Doch erst Bessel äußerte die bestimmte Ansicht, daß dieses Nichtstimmen des Planeten Uranus sich am einfachsten durch die Annahme eines unbekannten Planeten erklären lasse, der sich in noch größerer Entfernung von der Sonne als dieser bewege. Diese Vermutung Bessels bestätigte sich aufs glänzendste. Sie führte den jungen Leverrier zur Bahnbestimmung dieses noch nicht gesehenen Planeten und nach Veröffentlichung seiner Bahn zu seiner Entdeckung durch Galle (1846). Seitdem zeigen beide Planeten, Uranus und der neue Neptun, eine fast vollständige Übereinstimmung zwischen Beobachtung und den für sie von Newcomb berechneten Tafeln.

Sirius und Prokyon als Doppelsterne.

Und wie im Falle Uranus führte auch schon in einem zweiten, Doppelsterne betreffenden Falle die Kenntnis des Newtonschen Gesetzes zur Entdeckung von bisher unbekannten Körpern. Zwei Sterne, Prokyon im Sternbilde des kleinen und der helle Sirius in dem des großen Hundes erregten durch kleine innerhalb kürzerer Perioden sich wiederholende Schwankungen in ihren Eigenbewegungen die Aufmerksamkeit Bessels, der wie im Falle des Uranus auch da den Gedanken aussprach, daß diese Veränderlichkeit ihre einfachste und naturgemäße Erklärung finde in der Annahme, daß beide Sterne Doppelsterne seien, aber mit dunklen Begleitern. Das Überraschende und Neue in dieser Annahme, nämlich der Glaube an die Existenz dunkler Begleiter bei Fixsternen, brachte ihr anfangs viele Gegner, wiewohl Bessel die richtige Ansicht äußerte: Daß zahllose Sterne sichtbar sind, beweise offenbar nichts gegen das Dasein ebenso zahlloser unsichtbarer.

Die Bahn des dunklen Siriusbegleiters wurde von C. A. F. Peters 1851 berechnet und dieser selbst als ein Sternchen von der 8. Größenklasse, der nur, infolge des großen Glanzes des nahestehenden Sirius überstrahlt, schwierig zu sehen ist, durch Alvan Clark (1862) entdeckt und seitdem an vielen Sternwarten beobachtet. Die aus diesen Messungen abgeleitete Bahn sowie die von Peters aus der veränderlichen Eigenbewegung berechnete stehen miteinander in recht guter Übereinstimmung. Für Prokyon führte Auwers 1860 die Bahnbestimmung durch. Der Begleiter wurde aber erst 1896 durch Schäberle mit dem großen Refraktor der Licksternwarte als ein Sternchen 13. Größe entdeckt.

Die kleinen Planeten.

Was die Gruppe der kleinen Planeten zwischen Mars und Jupiter anlangt, so ist bis heute für wenige unter ihnen eine vollständige Bahnbestim-

mung und ein sorgfältiger Vergleich aller Beobachtungen mit der Theorie durchgeführt. Sie können also nicht dazu herangezogen werden, um an ihnen die Genauigkeit des Newtonschen Gesetzes zu prüfen.

Die Kometen.

Die Beobachtungen der Kometen wiederum besitzen nicht jenen Grad der Genauigkeit wie die der Planeten. Ihre unregelmäßige Figur, ihr verschwommenes Aussehen im Fernrohre machen sie zur genauen Pointierung und Messung wenig geeignet. Die bei der Bahnbestimmung von Kometen übrigbleibenden Fehler als Unterschiede zwischen Beobachtung und Rechnung sind daher im allgemeinen größer als die nach der Reduktion von Planetenbeobachtungen sich ergebenden und eignen sich daher viel weniger als diese zur Entscheidung der Frage nach der Genauigkeit des Newtonschen Gesetzes. Trotzdem ist die Übereinstimmung selbst für jene periodischen Kometen, die in mehreren Erscheinungen beobachtet wurden — bisher etwa 23 —, eine befriedigende. Mit Ausnahme einer Anomalie, die der berühmte Enckesche Komet zeigt und die sich in einer Beschleunigung seiner Bewegung oder Verkürzung seiner Umlaufszeit, die 3.305 Jahre zählt, um etwa 1—2 Stunden von Umlauf zu Umlauf äußert.

Der Erdmond.

Am schwierigsten gestaltet sich der Vergleich zwischen Theorie und Beobachtung beim Erdmond. Hier fehlt es zwar nicht an zahlreichen, den höchsterreichbaren Grad an Genauigkeit besitzenden Beobachtungen. Dazu kommt, daß auch ältere, aus früheren Jahrhunderten, ja sogar Jahrtausenden herrührende Angaben über Sonnen- und Mondfinsternisse, von denen die Geschichte berichtet, dazu benutzt werden können, um namentlich die säkularen Änderungen seiner Bahnelemente festzulegen. Dafür aber stehen einer rein analytisch durchzuführenden Theorie seiner Bewegung fast unüberwindliche Schwierigkeiten gegenüber, teils wegen der Größe der Störungen, die die Sonne durch ihre ungeheure Masse auf die rein elliptische Bahn des Mondes um die Erde ausübt, teils wegen der Störungen der Planeten, deren Berechnung, der direkten sowohl wie der indirekten, der aus den Störungen in den Bahnelementen der Erde durch die Planeten herrührenden hauptsächlich auf mathematische Schwierigkeiten stößt.

Zu den besten der neueren Zeit angehörenden Arbeiten über die Bahn des Mondes gehören: die Mondtheorie Hansens in Gotha nebst den aus ihr berechneten Tafeln, die 1857 von der englischen Admiralität herausgegeben wurden und die Grundlage für die in allen nautischen Jahrbüchern veröffentlichten Mondephemeriden bilden, dann Delaunay's Théorie de la lune, 1860 und 1867, und endlich die vielfach in ganz neuen Rechnungsmethoden sich bewegenden Entwicklungen von G. W. Hill mit deren Ergänzungen und Vervollständigungen durch Ernst Brown.

Schon Hansen gab einen Vergleich seiner Theorie mit allen Beobachtungen des Zeitraumes von 1750—1850 und fand, daß die Fehler nur 1″—2″ in Länge betragen. Newcomb dehnte den Vergleich auf die neueren Beobachtungen aus. Er wies nach, daß die Fehler langsam bis 5″ ansteigen, ja 1890 schon 20″ betrugen und so die Hansensche Mondtheorie keineswegs

eine vollständige ist. Die zutreffendste Korrektion, stellt er als Endergebnis seiner umfassenden Rechnungen fest, gehe dahin, an Stelle der von Hansen geforderten 12″.53 als säkularer Beschleunigung in der Länge des Mondes, welche Störung einer indirekten Einwirkung der Planeten, nämlich der durch sie hervorgerufenen säkularen Änderung in der Exzentrizität der Erdbahn, ihre Entstehung verdankt, die von Brown durch weitergetriebene Annäherungen berechneten 5″.81 zu setzen. Da aber die Verwertung der historischen Angaben über Finsternisse vom Jahre 382 v. Chr. an eine säkulare Beschleunigung von 8″ notwendig erscheinen lasse, so bleibe ein unaufgeklärter Rest von 2″—3″ für ein Jahrhundert übrig, um welchen der Mond sich rascher bewegt, als es die Theorie fordert. Zu ihm kommt hinzu als ein Fehler zweiter Art der Umstand, daß das Ansteigen der Differenzen zwischen Beobachtung und Rechnung kein gleichmäßiges ist, sondern merkwürdige Schwankungen von unregelmäßiger Periode zeige, deren Maxima in neuerer Zeit, aus der erst ununterbrochene Beobachtungsreihen über die Bewegung des Mondes vorliegen, in die Jahre 1861 und 1880 fielen, und deren Minima in 1852, 1874 und 1892 auftraten mit Amplituden von etwa 2—3″. Unexplained fluctuations nennt sie Newcomb.

Verbesserungsversuche.

III. Abänderungen des Newtonschen Gesetzes. Die Geschichte der Astronomie berichtet, daß stets, wenn die verfeinerte Beobachtungskunst der Astronomen neue Ungleichheiten in den Bewegungen der Planeten oder des Mondes erkennen ließ, deren Ableitung aus dem Newtonschen Gesetze nicht sofort gelingen wollte, der Gedanke auftrat, daß dieses Gesetz nicht genüge, um alle vorkommenden Bewegungsanomalien zu erklären, es vielmehr einer wenn auch nur geringen Korrektion bedürfe, oder daß neben der Gravitation noch Kräfte anderer Art im Sonnensystem vorhanden seien.

So fand Halley im Jahre 1693, daß seine Mondbeobachtungen und die seiner Zeitgenossen mit den Mondorten, die sich aus den aus dem Altertum überkommenen Nachrichten über Mond- und Sonnenfinsternisse ableiten lassen, nur dann in Einklang zu bringen sind, wenn man annehme, daß sich die mittlere Geschwindigkeit des Mondes in seiner Bahn um etwa 6″ im Jahrhundert beschleunige. Tobias Mayer bestätigte 1747 die Entdeckung Halleys und versuchte eine Erklärung für sie in der Annahme eines widerstehenden Mediums, in dem der Lauf des Mondes stattfinde. Die Anomalie selbst, die nach dem dritten Keplerschen Gesetze auf eine säkulare Abnahme der mittleren Entfernung zwischen Mond und Erde hinwies, erschien um so rätselhafter, als sowohl Lagrange wie Laplace in ihren mathematischen Störungstheorien das Gesetz streng bewiesen zu haben glaubten, daß die großen Achsen der Bahnen der Planeten und der Monde keinen säkularen, sondern nur periodischen Störungen unterworfen seien, und sie gerade auf dieses Gesetz besonderen Wert legten, da es in Verbindung mit den sehr kleinen Variationen der Exzentrizitäten und der Neigungswinkel der Bahnen einen Beweis für die Stabilität des Sonnensystems zu begründen schien.

Erst 1786 fand Laplace nach vielen Bemühungen den wahren Grund für die fragliche Anomalie, wie schon erwähnt, in einer indirekten Störungswirkung der Planeten, nämlich in der durch sie hervorgerufenen Variation der Exzentrizität der Erdbahn.

Clairaut, der sich seit 1743 mit einer Vervollständigung der Halleyschen Untersuchungen über die komplizierte Bahn des Mondes befaßte, fand in seinen ersten Rechnungen für die säkulare Störung des Mondperigäums einen Wert, der nur der Hälfte des aus den Beobachtungen bekannten gleichkam, und schrieb diese neue Anomalie einer Unvollständigkeit des Newtonschen Gesetzes und seiner notwendigen Ergänzung um ein der negativen dritten Potenz der Entfernung proportionales Glied zu. Erst auf Anraten Buffons hin, der auf die so wunderbare Einfachheit des Newtonschen Gesetzes hinwies, wiederholte er seine Rechnungen und kam zu dem Ergebnisse, daß er seine Näherungsrechnung zu wenig weit getrieben habe und daher diese und nicht das Newtonsche Gesetz einer Korrektur bedürfe.

Tobias Mayer, der sich ebenfalls eingehend mit der Mondtheorie befaßte, entdeckte 1752 eine kleine periodische Störung im Betrage von 8″ in ihr und suchte sie auf eine Verschiedenheit in der Anziehung der Sonne auf den Mond gegenüber der der Erde auf ihn zurückzuführen. Erst Laplace gab wieder die richtige Erklärung für sie durch den Nachweis, daß sie von der Abplattung der Erde herrühre, und daß der aus ihr erschlossene Wert für diese Größe mit den aus den geodätischen und Pendelmessungen herrührenden in sehr guter Übereinstimmung stehe.

Wird nun die moderne Astronomie, die auf Grundlage des Newtonschen Gesetzes bis auf die oben erwähnten kleinen, nur wenige Bogensekunden für ein Jahrhundert zählenden Fehler von den so verworrenen und verwickelten Bahnen des Himmelskörpers Rechenschaft gab, auch über sie in der gleichen Art triumphieren, wie es zu Ende des 18. Jahrhunderts zumeist Laplace glückte? Es ist klar, daß die Astronomen es als ihre Hauptaufgabe betrachteten, selbst diese geringen Unvollkommenheiten im Aufbau ihrer Wissenschaft zu beseitigen, und dazu mehrfache Versuche unternahmen und verschiedene Hypothesen aufstellten.

Die Merkurtheorie.

Was zunächst den größten Fehler, den in der Theorie des Merkur vorkommenden, anlangt, so teilen sich die Versuche zu seiner Beseitigung in zwei Gruppen; die erste zieht zu diesem Zwecke neue, bisher unbekannte Massen heran, eine Methode, die, wie oben berichtet wurde, im Falle des Uranus durch die Entdeckung des Neptun einen so außerordentlichen Erfolg brachte; die zweite versucht dieses Ziel zu erreichen durch eine formale Änderung, eventuelle Korrektion des Newtonschen Gesetzes selbst.

Ein intramerkurieller Planet (Vulkan).

So dachte man im Anschluß an Leverrier an einen Planeten, der noch innerhalb der Merkurbahn sich um die Sonne bewegen solle, und versuchte es unter der Annahme, daß der Fehlbetrag durch ihn als störenden Körper entstehe, seine Bahn zu berechnen. Aber um die ganze Störung von 41″ für ein Jahrhundert hervorzubringen, wäre, wie die Rechnung ergab, dem hypo-

thetischen Planeten mindestens die gleiche Masse zuzuschreiben wie dem Merkur selbst. Auch wenn er sonst bei den alltäglichen Durchmusterungen des Himmels stets in den Sonnenstrahlen verschwände und unsichtbar bliebe, müßte er doch bei Sonnenfinsternissen als hellglänzender Stern hervortreten oder bei seinen häufigen Vorübergängen vor der Sonnenscheibe als scharf begrenzter dunkler Körper wahrzunehmen sein. Nichts von alledem ist bisher trotz eifriger Nachforschung beobachtet worden. Die Hypothese des intramerkuriellen Planeten muß daher fallen gelassen werden.

Die elliptische Gestalt der Sonne.

Man ersetzte ferner den einzelnen Planeten durch einen Ring von kleinen Planeten, die nach Art des Ringes der Asteroiden zwischen Mars und Jupiter sich um die Sonne bewegen. Man nahm an, daß dieser Ring sich direkt an die Sonne anschließe, und kam so zu der neuen Hypothese, daß die Sonne keine reine Kugel sei, sondern gleich der Erde die Form eines Rotationsellipsoides habe, deren Äquatorebene mit der Ekliptik zusammenfalle. Aber die Rechnung führt hier auf dieselbe Schwierigkeit wie im Falle eines einzelnen Planeten. Sie sagt, daß die Masse dieses äquatorealen Wulstes an der Sonne im Vergleiche zu ihrer ganzen Masse recht beträchtlich, ihre Abplattung daher zu groß sein müßte. Der Unterschied zwischen dem äquatorealen und polaren Radius wäre mindestens zu 0″.5 anzusetzen. Die zahlreichen, in allen möglichen Richtungen am Bilde der Sonne im Fernrohre durchgeführten Messungen ihrer scheinbaren Größe lassen indes, wie Auwers durch eine sehr sorgfältige Diskussion nachwies, keine Spur einer Abplattung erkennen. Zudem lehrt auch die Theorie der Gleichgewichtsfiguren, daß die Sonne wegen ihrer recht langsamen Rotation, deren Periode 25 Tage zählt, nur eine sehr geringe Abplattung haben könne, nach Newton nur von der Größe von 1 : 38000, der als Differenz zwischen polarem und äquatorealem Radius nur 0″.05 entsprechen könnte. Damit ist der negative Erfolg auch dieses Erklärungsversuches entschieden.

Das Zodiakallicht.

Die Hypothese der ringförmigen Ausstreuung von kleinen Planeten in dem Raume zwischen Sonne und Merkur wurde neuestens 1906 von v. Seeliger nochmals aufgenommen. Indes in einer etwas anderen Form. v. Seeliger setzt an Stelle kleiner diskreter Planetoiden fein zerstreute Materie, die scheibenförmig mit zur Ekliptik paralleler Hauptfläche um die Sonne lagere und über die Merkurbahn, ja selbst über die der Venus und die Erde hinaus fast bis an den Mars heranreiche. Auf die Annahme eines solchen Staubringes, dessen einzelne Teilchen im reflektierten Sonnenlicht schwach leuchten und dadurch sichtbar werden, führt der einfachste Versuch zur Erklärung des Zodiakallichtes, und v. Seeliger beweist, daß ganz plausible, nach keiner Richtung hin auf unzulässige oder auch nur auffallende Verhältnisse hindeutende Annahmen über die Dichte der Massen und ihre Verteilung in diesem Ringe genügen, die Bewegungsanomalie beim Merkur zu beseitigen. Ja noch mehr, es werden durch sie gleichzeitig auch die zwei weitaus kleineren und nicht so sicher verbürgten Fehler in der Theorie der beiden Planeten Venus und Mars, die oben (S. 601) mitgeteilt wurden, erklärt. Ein Um-

stand, der diese Hypothese als die sympathischste erscheinen läßt, da durch sie eine volle Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung in den Bewegungen der vier inneren Planeten erzielt, jeder Zweifel an der Richtigkeit des Newtonschen Gesetzes hinfällig und gleichzeitig eine Erscheinung mitbestimmt wird, die sonst ganz rätselhaft bliebe. Die Annahmen selbst über die Ausbreitung des Staubringes sind die eines solchen zwischen Sonne und Merkur und eines zweiten zwischen Erde und Mars, deren Massen zusammen zu 1 : 3.000 000 der Sonnen- oder 1 : 10 der Erdmasse anzusetzen wären.

Änderung des Exponenten.

Von den Versuchen zur Erklärung der Merkuranomalie, die auf einer Modifikation des Newtonschen Gesetzes beruhen, sei vorerst der erwähnt, nach dem man die Anziehung zweier Massenteilchen nicht mehr der zweiten Potenz ihrer Entfernung invers proportional setzt, sondern im Potenzexponenten eine geringe Abweichung von der Zahl 2 annimmt und so dem Nenner im mathematischen Ausdruck hierfür die Form $r^{2+\lambda}$ an Stelle von r^2 gibt. Schon Newton behandelte in seinen principiis diesen Fall. Er bewies, daß eine solche formale Änderung eine säkulare Störung der Perihele der Planetenbahnen verursache, und daß aus der Tatsache, daß derartige Anomalien bisher bei den Planeten nicht erwiesen wurden, ein Rückschluß auf die Genauigkeit des Exponenten 2 im Ausdruck für die Anziehungsgesetze zu ziehen sei. Umgekehrt kann man, wie zuerst Asaph Hall versuchte, diese Differenz im Newtonschen Gesetz dazu benutzen, durch sie den Fehlbetrag der Merkurtheorie zu erklären. Die Rechnung ergibt für diese Differenz den Wert $\lambda = 0.000000153$, so daß der Nenner $r^{2.000000153}$ statt r^2 zu lauten hätte. Wie man sieht, eine sehr kleine Größe, die auf die Perihelbewegungen der anderen Planeten fast ohne merklichen Einfluß ist und ebenso die säkulare Perigäumsbewegung des Mondes nur äußerst wenig ändert.

Die Unendlichkeit der Welt.

Auf die Notwendigkeit einer formalen Änderung des Newtonschen Gravitationsgesetzes weisen auch Untersuchungen hin, die mit Carl Neumann beginnen und von v. Seeliger 1896 erweitert wurden. Sie sagen, daß dieses Gesetz keineswegs als ein universelles, d. h. als ein mathematisch genauer Ausdruck für alle im Weltenraume herrschenden Anziehungskräfte gelten könne, da es mit der Annahme eines unendlichen Raumes mit unendlicher Massenerfüllung nicht verträglich sei. Denkt man sich nämlich die wirklich vorhandenen, aber diskret verteilten Massen der Sterne durch eine kontinuierliche Verteilung ersetzt und nimmt an, daß der Raum unendlich groß sei, so läßt sich beweisen, daß die auf jeden einzelnen Punkt ausgeübten Kräfte ihrer Größe und ihrer Richtung nach vollständig unbestimmt, wenn nicht gar unendlich groß würden, was natürlich jede Stabilität von in diesem Raume befindlichen endlichen und geschlossenen Systemen, wie es unser Sonnensystem ist, unmöglich macht. Man hat daher nur zwischen zwei Annahmen die Wahl, entweder zu behaupten, die gesamte Masse des Weltalls ist unendlich, dann kann das reine Newtonsche Gesetz nicht der strenge Ausdruck für die Anziehung zweier Massenkörper sein, oder dieses Gesetz

als ein absolut genaues hinzustellen, dann wieder ist es unmöglich, daß der unendlich große Raum der Fixsternwelt mit Masse von endlicher Dichte erfüllt ist.

Die Theorie des Enckeschen Kometen. Das widerstehende Medium.

Nicht mindere Schwierigkeiten macht den Astronomen die Erklärung der Bewegungsanomalie in der Theorie des Enckeschen Kometen. Encke führte hierzu die Hypothese des widerstehenden Mittels ein. Anfangs mit gutem Erfolge. Vom Jahre 1819 bis 1865 in den zahlreichen Erscheinungen des Kometen war die Übereinstimmung zwischen der auf dieser Hypothese aufgebauten Rechnung mit den am Himmel beobachteten Orten eine so schöne, daß an ihrer Richtigkeit fast nicht gezweifelt werden konnte. Die angenommene empirische Korrektion betrug hierbei $0''.1044$ in der täglichen Geschwindigkeit des Kometen oder 2^h48^m für seinen Umlauf von 3.305 Jahren. Im Jahre 1865 trat aber eine Wendung ein. Von da ab reichten einzig die planetarischen Störungen aus, den Lauf des Kometen darzustellen. Die Berücksichtigung einer außergewöhnlichen Störung erwies sich als überflüssig. Vom Jahre 1875 an mußte sie wieder zu Hilfe gerufen werden, um einen besseren Einklang zu erzielen. Doch als neue Störung genügte der Betrag von $0''.0544$ in der täglichen Bewegung oder 1^h27^m Umlaufsverkürzung. Die neuesten Erscheinungen endlich aus den Jahren 1904, 1908 und 1911 geben $0''.011$ als empirisch anzubringende Korrektion. Die Frage wurde nach allen diesen Ergebnissen eine noch schwierigere. Sie hat jetzt nicht nur die Anomalie selbst, sondern ihre ganz rätselhaften Änderungen zu erklären. Keinesfalls kann die Enckesche Theorie mit ihrer ursprünglichen Form, die dem widerstehenden Mittel eine regelmäßige Anordnung rings um die Sonne zuschreibt, aufrechterhalten werden, noch weniger die, welche dieses Medium mit dem Lichtäther identifiziert. Vielmehr ist sie dahin zu modifizieren, daß es in der Nähe der Sonne ganz unregelmäßig verteilt ist und dadurch ganz unregelmäßige, plötzlich sich ändernde Störungen hervorruft. Man denke etwa an Staubmassen oder Meteorströme, die der Komet in seinem Laufe um die Sonne durchquert.

Die Theorie des Erdmondes. Flutreibung und Verzögerung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde.

Die letzte unter den Abweichungen in den Bewegungstheorien der Himmelskörper sind die zwei Anomalien im Laufe des Mondes, die säkulare Beschleunigung in seiner mittleren Bewegung von etwa 2—3″ im Jahrhundert und die eigentümlichen Schwankungen, die sich in den seit 1850 stetig ansteigenden Fehlerdifferenzen zeigen. Beide sind sehr klein. Man kann auch nicht sagen, daß sie aus den Beobachtungen zweifellos konstatiert sind; besitzt doch, wie schon erwähnt, die Mondtheorie noch keineswegs jenen hohen Grad einer exakten Durchführung, wie sie den Planetentheorien zukommt. Die Versuche zu ihrer Erklärung zielen meist dahin, sie nicht als reell, sondern nur als scheinbar vorhanden anzunehmen, verursacht durch eine reelle Verzögerung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde und ihr entsprechend eine Zunahme der Länge des mittleren Sonnentages, des astronomischen Normalzeitmaßes, damit in Verbindung eine Verzögerung in der Zählung der Tage, deren Übertragung auf den Lauf des Mondes dadurch eine schein-

bare Beschleunigung in seiner Bewegung bedingt. Die Rechnung lehrt, daß schon die Annahme, daß die richtige Zeit nach 100 Jahren um 4 Sekunden hinter der beobachteten zurückbleibt, wenn sie mit der jetzt beobachteten Rotationsdauer der Erde gleichmäßig fortgezählt wird, genügend ist, die Abweichungen von 2″ zu beseitigen.

Als Ursache dieser Verzögerung der Rotationsgeschwindigkeit geben Adams und Delaunay die Flutreibung an, die den hemmenden Einfluß, den die durch die Anziehung von Mond und Sonne auf die beweglichen Wassermassen auf der Erdoberfläche erzeugten Ebbe- und Flutbewegungen durch ihre Reibung am Meeresgrunde oder dieselben Fluterscheinungen in den zähflüssigen Massen im Innern der Erde auf deren Rotation ausüben. Die Wasserhülle der Erde ist, wie die Theorie dieser Erscheinungen lehrt, als ein gegen den Mond hin verlängertes Ellipsoid aufzufassen, dessen Verlängerungen, die zwei Flutberge, an den Enden des nach dem Monde gerichteten Durchmessers dem Mondlaufe folgen und daher, da dieser sehr langsam erfolgt, auch nur sehr langsam fortschreiten, während die kugelige Erde unter ihnen viel rascher rotiert. Sie wirken folglich wie die beiden Backen einer Eisenbahnbremse, die sich an das rotierende Rad anlegen und seine Umdrehung verlangsamen.

Auch zur Erklärung der periodischen Schwankungen im Laufe des Mondes könnte die gleiche Hypothese herangezogen werden. Man brauchte sie nur durch die Anschauung zu ergänzen, daß die Flutreibung keine konstante und daher eine stetige Zunahme der Tageslänge erzeugende Kraft, vielmehr periodisch veränderlich ist, so daß ihr neben der scheinbaren und konstanten Beschleunigung auch deren beobachtete unregelmäßige Variationen entsprechen.

Solange es aber nicht gelingen sollte, diese Zunahme der Tagesdauer auch aus anderen Erscheinungen zu erschließen, dürfte es schwer sein, eine so weitgehende Hypothese, wie es die geforderte Änderung unserer Zeiteinheit ist, anzunehmen. Gibt es nun Erscheinungen, die hierüber Aufschluß geben können? Die Frage ist zu bejahen. Es sind dies hauptsächlich solche, die in regelmäßig aneinander sich reihenden Zeitläufen erfolgen, andererseits recht zahlreich sind und sich mit ziemlicher Genauigkeit beobachten lassen, so daß aus den Zeitunterschieden zwischen ihrer theoretischen Vorausberechnung und der tatsächlichen Beobachtung auf Anomalien geschlossen werden könnte, die in der Zählung der Zeit auftreten. Beispiele wären: die Vorübergänge des Merkur vor der Sonnenscheibe, von denen durchschnittlich 13 in einem Jahrhundert erfolgen, ferner die Verfinsterungen und die Vorübergänge der vier hellen Jupitermonde. Leider steht eine strenge Diskussion der bisher angestellten Beobachtungen beider Erscheinungen nach dieser Richtung noch aus.

Absorption der Gravitation.

Zur Erklärung der kleinen Fluktuationen in der Bewegung des Mondes haben neuerdings fast gleichzeitig Bottlinger in München und de Sitter in Leiden (1912) eine Absorption der Gravitation heranziehen wollen, die bei

Mondfinsternissen erfolgt, wenn der von der Sonne kommende Gravitationsstrahl, ehe er auf den Mond fällt, den Erdkörper durchdringt. Die Schwächung bei diesem Durchgang verursacht eine Änderung in der Geschwindigkeit des Mondes, die einzeln wohl recht klein sein mag, aber bei der Häufigkeit von Finsternissen doch eine erkleckliche summierte Wirkung abgeben könne. Der Erfolg dieser Anschauung war aber ein negativer. Es konnten namentlich die Perioden beider Erscheinungen nicht in Übereinstimmung gebracht werden.

Neben dieser Absorption, die Bottlinger eine innere nennt, kann auch eine kosmische angenommen werden, die bei der Ausbreitung der Gravitation in dem Medium zwischen den Himmelskörpern selbst erfolgt. Auf sie machte zuerst Laplace aufmerksam. Er untersucht ihren Einfluß in der Art, daß er dem mathematischen Ausdruck für das Newtonsche Gesetz den Faktor $e^{-\lambda r}$ hinzufügt und dann nachweist, daß der Absorptionskoeffizient λ höchstens gleich 1 : 1000000 angesetzt werden könne, wenn man nicht mit dem Laufe des Mondes, d. i. mit der Identität zwischen der Fallbeschleunigung auf der Erdoberfläche und der Anziehung des Mondes durch die Erde, für welche er eine Genauigkeit von 0.2 % ansetzt, in Widerspruch kommen wolle.

Die damit ausgesprochene neue Form des Newtonschen Gesetzes verdient auch insofern Beachtung, als durch ihre Annahme die von C. Neumann, dann von v. Seeliger hervorgehobene Schwierigkeit der Ausdehnung seiner Gültigkeit auf den unendlichen Raum verschwindet.

Descartes und Newton.

IV. Erklärung der Gravitation. Schon vor Newton hatte Descartes in seiner Wirbeltheorie einen Versuch unternommen, die Bewegung der Himmelskörper auf ein einheitliches Grundgesetz zurückzuführen. Er ging von der Annahme eines den ganzen Weltraum erfüllenden feinen Mediums, des Äthers, aus, in dem, hervorgerufen durch die rotierende Sonne, lebhafte Wirbelbewegungen stattfinden, durch welche die Planeten mitgerissen ihre ewigen Bahnen um die Sonne wie die Monde ihrerseits um die Planeten beschreiben.

Im Vergleiche zur Newtonschen Lehre schien sie einfacher und anschaulicher zu sein, aber, wie Newton hervorhebt, andererseits wieder einer mathematischen Behandlung nur schwer zugänglich. Jedermann hatte wohl schon kleine Gegenstände in Wasserwirbeln im Kreise herumtreiben gesehen und glaubte sich nach diesem Beispiel eine klare Vorstellung von der Bewegung der Planeten bilden zu können. Dem gegenüber war die Newtonsche Auffassung weniger verständlich, verlangte sie doch die viel schwierigere Vorstellung von Weltkörpern, die frei im Weltenraume schweben sollten, getragen und bewegt bloß von einer zwischen ihnen wirkenden, sonst aber nicht fühlbaren Kraft, und erweckte damit den Anschein, als ob sie die alten unerklärlichen und geheimnisvollen Eigenschaften der Körper der Aristotelischen Schule, die man seit Descartes glücklich beseitigt zu haben glaubte, wieder neu aufleben lasse.

Newton gab auf die Frage nach dem Wesen der Gravitation keine entscheidende Antwort. Mit den Worten: „Hypotheses non fingo“ weist er jeden Versuch ihrer Erklärung oder Zurückführung auf einfache mechanische Vorgänge als nicht in das Gebiet der reinen Empirie gehörig zurück — wenn es ihm auch unbegreiflich scheine, wie unbeseelte rohe Materie ohne Vermittlung von sonst etwas, was nicht materiell ist, auf andere Materie ohne direkte Berührung einzuwirken imstande ist. Die Gravitation als Fernewirkung.

Die Physik verhielt sich daher vorerst ablehnend gegen die neue Lehre, und es brauchte lange Zeit, ehe sie sich nach Gebühr Ansehen und Geltung verschaffte. Doch nach ihrem endlichen Siege kehrte sich die Sachlage rasch um. Aus den begeistertsten Anhängern Descartes' und seiner physikalischen Schule wurden ebenso glühende Verehrer Newtons und seiner Lehre von der Gravitation als einer Kraft, die ohne jede Vermittlung, d. h. ohne jede Beeinflussung durch das zwischenliegende Medium, direkt in die weitesten Fernen reiche und zu dieser Fortpflanzung keine Zeit brauche oder, wie hier ein trefflicher Ausspruch Faradays lautet, den Raum überspringe.

Zu diesem Wechsel der Ansichten trugen wesentlich zwei Umstände bei. In erster Linie die vielfachen und großartigen Erfolge, auf die die theoretische Astronomie auf Grund der Newtonschen Lehre hinweisen konnte. Sodann die Beschäftigung mit den elektrischen und magnetischen Erscheinungen, denen man sich damals mit besonderem Eifer zu widmen begann. Es zeigte sich da eine merkwürdige Analogie zwischen den Kräften, die diese Erscheinungen hervorrufen, und der Gravitation. Sie erstreckt sich sowohl auf die scheinbar unvermittelt in die Ferne gehende Art ihrer Wirksamkeit wie auch auf das Gesetz für sie. Genau so wie man den Teilchen der schweren Masse die Eigenschaft der gegenseitigen Anziehung zuschrieb, schien auch zur Erklärung der Elektrizität und des Magnetismus die Annahme zweier elektrischer und magnetischer Fluida als Träger der ihnen entsprechenden Kräfte zu genügen, und die auf dieser Stofftheorie ausgebildete mathematische Lehre dieser beiden Erscheinungsgruppen konnte über das gesamte zur Zeit experimentell bekannte Tatsachenmaterial fast vollständig Rechenschaft geben. Analogie mit den elektrischen und magnetischen Kräften.

Lange Zeit herrschte diese merkwürdige Theorie von den drei unvermittelt in die Ferne wirkenden Kräften, der Gravitation, der Elektrizität und dem Magnetismus in der Physik. Ein Gegner entstand ihr (um 1830) in dem englischen Physiker und Experimentator Michael Faraday. Ihm schwebte als Hauptziel der Physik die Aufgabe vor, die Vorstellung dieser eigentümlichen Kräfte, die unbeirrt vom Zwischenmedium in die Ferne wirken und keine noch so geringe Zeit zu ihrer Ausbreitung benötigen sollten, zu widerlegen und sie durch die Hypothese einer stofflichen Übertragung zu ersetzen. Faraday.

Nach zwei Richtungen war ein solcher Unmöglichkeitsbeweis zu erbringen. Einmal in dem Nachweis, daß das Medium, in dem die elektrischen und magnetischen Erscheinungen sich abspielen, auf ihren Verlauf einen wesentlichen und auch der Beobachtung zugänglichen Einfluß habe. Denn dann

schreite ja die Wirkung dieser Kräfte nicht unvermittelt in die Ferne, sondern werde von Teilchen zu Teilchen durch das zwischenliegende Medium übertragen. Dann aber weiter in dem, daß das Fortschreiten dieser Wirkung eine meßbare Zeit brauche und keineswegs momentan erfolge. Der erste Nachweis gelang Faraday vollständig. Es glückte ihm durch viele Experimente zu zeigen, wie die Stärke eines Magneten oder eines elektrisch geladenen Körpers mit der stofflichen Natur des Zwischenmediums zusammenhänge und so das dem Newtonschen analoge Coulombsche Gesetz einer dieses Abhängigkeitsverhältnis charakterisierenden Korrektion bedürfe. Dagegen aber gelang es ihm noch nicht, auch die Zeit für das Fortschreiten dieser Wirkung, d. h. ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit, zu messen.

Maxwell und Hertz.

Hier setzte erst der geniale Physiker H. Hertz ein. Er fand für sie den Wert von 300 000 km in der Sekunde, eine Größe, die mit der bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes zusammenfällt. Er wies weiter durch zahlreiche Experimente im Anschluß an die bedeutsamen analytischen Entwicklungen Maxwells, der die Faradayschen Ideen in das zur Erzielung voller Klarheit notwendige mathematische Gewand gekleidet hatte, nach, daß diese Übereinstimmung zwischen den beiden Fortpflanzungsgeschwindigkeiten kein Zufall, vielmehr überhaupt die Gesetze der Fortpflanzung der elektromagnetischen Wellen mit denen der Lichtbewegung identisch seien. Damit erscheint die elektromagnetische Theorie des Lichtes begründet, und in der drahtlosen Telegraphie verwertet man heute die von Faraday geahnten, von Maxwell durch mathematische Deduktionen als wahrscheinlich hingestellten und von Hertz endlich experimentell nachgewiesenen elektromagnetischen Wellen für praktische Zwecke. Damit war ferner, wie Hertz sagt, die von der Wissenschaft wohl geheiligte, vom Verstande aber nur ungern getragene Herrschaft der unvermittelten Fernkräfte im Gebiete der magnetischen und elektrischen Erscheinungen für immer durch einfache und schlagende Versuche zerstört. Es blieb einzig die Gravitation übrig, für die die alte Theorie der unvermittelten Fernwirkung als zu Recht bestehend angenommen werden mußte, abgesehen von den Molekularkräften, deren Wirkungsbereich ohnehin ein äußerst kleiner ist.

Mechanismus der Gravitation.

Es ist klar, daß während dieser ganzen Entwicklungsperiode der Physik viele Versuche gemacht und die verschiedensten Hypothesen aufgestellt wurden, um auch diese Kraft ihres geheimnisvollen Gewandes zu entkleiden und auf ihre letzte Ursache zurückzuführen.

Diese verschiedenen Theorien gingen von der Annahme aus, daß ein feines Medium, der Äther, den ganzen Weltraum fülle, der, sowie er der Träger der Erscheinungen des Lichtes, der Elektrizität, des Magnetismus und der strahlenden Wärme sei, auch als Träger jener hypothetischen Bewegungen auftrete, die die letzte Ursache der Gravitation bilden. Sie unterscheiden sich nur darin voneinander, daß sie ihm verschiedene mechanische Eigenschaften zuerteilen und so auf verschiedene Arten den Mechanismus der Gravitation zu konstruieren versuchen. Die einen sprechen von Druck-

differenzen und dadurch veranlaßten Strömungen im Äther, die die in ihm eingebetteten Körper mit sich führen, ihnen einen Bewegungsantrieb von den Stellen größerer zu denen geringerer Dichte erteilen und damit eine der Gravitation analoge scheinbare Wirkung hervorrufen. Andere wieder sprechen vom Stoße der bewegten Ätheratome, darnach ein isolierter materieller Körper wohl im Äther in Ruhe bleibe, weil die von allen Seiten in gleicher Stärke auf ihn wirkenden Stöße sich gegenseitig neutralisieren, zwei Körper aber, die sich im Äther befinden, einen Bewegungsimpuls gegeneinander erfahren, weil sie sich an den zugekehrten Seiten vor den Stößen schirmen. Eine dritte Hypothese sieht die Ursache der Gravitation in Schwingungen des Äthers. Natürlich müßten diese im Gegensatze zu den Lichtschwingungen longitudinale sein. Dies führt zu der neuen Vorstellung, daß die Schwingungen Pulsationen der Körpermoleküle sind, welche durch den Äther vermittelt sich von Körper zu Körper fortpflanzen und deren Annäherung bewirken. In der Tat gelang es durch Experimente an hydrodynamischen Modellen nachzuweisen, daß zwei pulsierende Kugeln in einer fast unzusammendrückbaren Flüssigkeit aufeinander eine Anziehung ausüben, sofern die Pulsationen nach Schwingungszahl und Phase übereinstimmen. Diese Anziehung ist proportional der Intensität der Schwingungen, das wäre die Masse der Körper, und invers proportional dem Quadrate der Entfernung — in voller Analogie mit dem Newtonschen Gesetze.

Kritik der mechanischen Theorien.

Keiner dieser Erklärungsversuche bestand jedoch die Prüfung vor einer strengen Kritik. Viele begnügten sich mit der rein formalen Ableitung des Newtonschen Gesetzes und versäumten es auf die Frage näher einzugehen, ob und inwieweit der Gravitationsäther mit dem des Lichtes, der Elektrizität und des Magnetismus identifiziert werden könnte. Tatsächlich zeigte auch eine genauere Bestimmung der die spezifischen Eigenschaften des Gravitationsmediums charakterisierenden Konstanten wie seiner Dichte, seiner Elastizität in vielen Fällen die Unmöglichkeit dieser Identität. Die beiden Ätherarten müßten danach wesentliche Verschiedenheiten aufweisen und würden so zu der äußerst unwahrscheinlichen Vorstellung zweier ineinander geschachtelter Ätherarten drängen.

Eine Schwierigkeit ferner, mit der die Stoßtheorie zu kämpfen hat, besteht darin, daß nach ihr die anziehende Wirkung zweier Körper durch das Dazwischentreten eines dritten modifiziert und so eine Erscheinung hervorgerufen würde, die analog ist der inneren Absorption der Gravitation, die, wie oben S. 609 berichtet wurde, von Bottlinger und de Sitter zur Erklärung der unregelmäßigen Schwankungen in der Bewegung des Mondes mit negativem Erfolg herangezogen wurde.

Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation.

Als letzte kommt die Frage nach der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation in Betracht. Diese müßte, wenn derartige Mechanismen sie tatsächlich erklären sollen, einen endlichen Wert haben, während sie nach der alten Annahme einer unvermittelten Fernwirkung unendlich ist. Ihr Einfluß würde sich in kleinen Unregelmäßigkeiten in der Bahnbewegung der

Himmelskörper äußern, die auch, wenn sie konstatiert sind, zur Berechnung dieser Geschwindigkeit dienen könnten.

Ansatz von Laplace.

Von diesem Standpunkte aus ist die Frage nach der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation mehrfach behandelt worden. Man versuchte durch sie namentlich die zwei bedeutungsvollsten der bekannten Anomalien, die in der Bewegung des Erdmondes und des Merkur, zu beseitigen. Der erste, der sich mit der Frage befaßte, war Laplace. Er versuchte den Einfluß einer endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit auf die Annahme zurückzuführen, daß der von der Sonne nach den Planeten ausgehende Gravitationsstrahl nach Art der Abberration von der reinen Richtung zum Radiusvektor ein wenig abweiche und so eine Störungskomponente hervorrufe, die auf dieser Richtung senkrecht steht und dem Verhältnisse der Geschwindigkeit des Planeten zu der der Gravitation proportional ist. Wie die Rechnung ergibt, entspringt ihr als größte Störung eine säkulare Beschleunigung in der Länge. Verwertet man sie aber dazu, durch sie die Abweichung in der Mondtheorie zu beheben, für die Laplace noch 6″ für ein Jahrhundert setzt, so folgt für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation die enorme Zahl von 12000000 mal größer als die des Lichtes.

Etwas weitgehender als bei Laplace ist der Ansatz der Störungsgleichungen bei Lehmann-Filhés und v. Hepperger. Das Ergebnis ihrer Berechnungen ist jedoch noch ungünstiger. Sie erhalten nämlich an Stelle einer säkularen Beschleunigung eine solche Verzögerung.

Ersatz des Newtonschen durch ein elektrodynamisches Fernkraftgesetz.

Schließlich wären hier zu erwähnen die Versuche, das Newtonsche Gesetz, das in seiner formalen Gleichheit mit dem Coulombschen Gesetz für ruhende Körper gilt, zu ersetzen durch das Webersche oder Riemannsche, die, wie bekannt, die ersten Arten elektrodynamischer Fernkraftgesetze waren und als eine Art Übertragung der Anziehungsgesetze zwischen ruhenden auf die zwischen bewegten Körpern aufgefaßt werden können. Die Berechnung der Planetenbewegungen auf ihrer Grundlage führte merkwürdigerweise nur auf säkulare Perihel- und nicht mehr auf Längenstörungen. Die Schwierigkeiten der Mondtheorie bleiben durch sie gänzlich unerledigt und, verwertet man sie zur Behebung der der Merkurbewegung, so resultiert für die in ihnen auftretende kritische Geschwindigkeit, die identisch wäre mit der Fortpflanzung der Gravitation, ein Wert, der nur $\frac{1}{\sqrt{3}}$ bzw. $\sqrt{\frac{2}{3}}$ mal so groß ist als die des Lichtes.

Nach allen diesen mißlungenen Versuchen sprach Paul du Bois Reymond in einem vor der physikalischen Gesellschaft in Berlin im Jahre 1898 gehaltenen Vortrag so wie über mehrere andere auch über das vorliegende Problem der Zurückführung der Gravitation auf mechanische Kräfte sein düsteres Ignorabimus aus und wollte damit aus seiner bisherigen Ungelöstheit auf seine Unlösbarkeit schließen.

V. Elektronentheorie. Seitdem trat aber wieder die Elektrizitätslehre in eine neue Entwicklungsphase. Es ist dies die interessante Theorie der Elektronen. Durch sie wird erst das volle Übergewicht der elektromagnetischen Lichttheorie und der ihr zugrundeliegenden Gedanken über die alte Mechanik der Fernkräfte ausgesprochen und ein neues Weltbild, das elektromagnetische, begründet, in dem die Elektronen die Hauptrolle spielen. Darauf, welche Bedeutung diese neue Theorie für die gesamte Physik hat, kann hier nicht näher eingegangen werden. Es muß genügen, nur jene Momente zu erwähnen, die der speziellen Anwendung auf die Astronomie dienen. Diese sind: die Möglichkeit der Begründung der Trägheit der Materie und ein neuer Versuch der Erklärung der Gravitation durch ihr Zurückführen auf das Spiel von Elektronen. Die Elektronentheorie.

Der Gedankengang, der zu dem ersten Punkte führt, ist der folgende: Tritt man an eine Stromleitung heran und schließt den Strom, so lehrt das Experiment, daß er nicht sofort in voller Stärke durch den Draht fließt, sondern einige Zeit braucht, um zu voller Stärke anzuwachsen. Die Ursache davon liegt in der Selbstinduktion, d. i. in der Tatsache, daß der Strom im Momente des Schließens einen sich selbst entgegengesetzt gerichteten Strom, den Schließungsstrom, hervorruft, der trotz seiner kurzen Lebensdauer den primären Strom nicht sofort, sondern allmählich zu seiner vollen Intensität ansteigen läßt. Oder, mit anderen Worten, der beginnende Strom verbraucht einen Teil seiner Energie zur Erzeugung des ihm entsprechenden magnetischen Feldes, und erst wenn dieses vorhanden ist, fließt der Strom in normaler Stärke so lange weiter, als seine Quelle, die elektromotorische Kraft, reicht. Im Momente des Unterbrechens zeigt sich eine neue Eigentümlichkeit, das Entstehen des Öffnungsstromes. Er ist dem ursprünglichen gleichgerichtet, verstärkt ihn daher und bewirkt an der Unterbrechungsstelle ein Überfließen des Stromes, das sich in der Form eines hellen Funkens äußert. Oder die durch das Verschwinden des magnetischen Feldes in der Umgebung des unterbrochenen Stromes freiwerdende Energie treibt ihn noch ein wenig in der alten Richtung weiter. Es hat den Anschein, als ob der Strom noch weiter fließen wollte, da er aber dies nicht kann, sich durch einen Funken Luft macht. Die Trägheit der Materie.

Beide Erscheinnngen stehen in einer merkwürdigen Analogie mit der Trägheit der Materie. Will man einen Stein fortschleudern, so ist dazu eine Kraft notwendig, die ihn in Bewegung setzt. Der Stein, der in Ruhe war, sträubt sich dagegen, aus dem Zustande der Ruhe plötzlich in den der Bewegung überzugehen, genau so wie der elektrische Strom im Momente des Schließens. Ist der Stein aber wieder in Bewegung, so will er in diesem Zustande beharren. Er wehrt sich gegen den Übergang in die Ruhe, wie der einmal fließende Strom gegen die Unterbrechung.

Der elektrische Strom täuscht uns also eine Art Trägheit vor. Es scheint, als ob er eine gewisse Masse hat, wie der Stein seine träge Masse. In dieser Auffassung ist die ältere mechanistische Theorie begründet, nach Elektromagnetischer Ursprung der Trägheit.

der die Trägheit zu den fundamentalen Eigenschaften der Körper gehört und sonst unerklärbar ist. Nun kehrt man den Sachverhalt um. Man sagt, nicht der elektrische Strom täuscht uns die Trägheit vor, sondern die Trägheit des Steines ist die scheinbare und besteht in Wirklichkeit in dem Spiel der Elektronen in ihm, den durch sie hervorgerufenen Strömen und deren Selbstinduktion.

Damit erscheint der erste Punkt der Bewegungsastronomie, nämlich das Rätsel der Trägheit der Materie, in einem neuen Lichte, wenn nicht vielleicht gelöst.

H. A. Lorentz' Theorie der Gravitation.

Der zweite Punkt bezieht sich auf das Gravitationsproblem. Seiner Erklärung legt H. A. Lorentz die Auffassung zugrunde, daß ungleichnamige Elektrizitäten sich um ein ganz geringes stärker anziehen, als sich gleichnamige abstoßen. Die Differenz mag so gering sein, daß sie weitaus unter der Empfindlichkeitsgrenze aller, selbst der bestkonstruierten Meßapparate liege. Trotzdem resultiert aus ihr eine anziehende Kraft zwischen nicht geladenen, sich aus einer gleichgroßen Menge positiver und negativer Ionen zusammensetzenden Körper, die hinreicht, die Newtonsche Gravitation zu erklären. Doch folgt für sie nicht mehr das reine Newtonsche Gesetz, sondern es treten Zusatzglieder auf, welche von der Eigenbewegung der Sonne, von der relativen Bewegung der Planeten gegen die Sonne im Verhältnisse zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation, die hier als mit der des Lichtes identisch angesetzt wird, abhängen. Als größte Störung resultiert eine säkulare Perihelbewegung, die auf dem Planeten Merkur angewendet bloß $7''.2$ statt der fraglichen $41''$ gibt. Die Theorie weist also einen negativen Erfolg auf, mindestens keinen vollen positiven, um sie restlos zu akzeptieren.

VI. Die Relativitätslehre. An die Elektronentheorie schließt deren neueste Ergänzung, die „revolutionäre" Relativitätstheorie Einsteins, an. Ihren Ursprung nahm sie aus der Frage, welche Rolle der Äther in dem elektro-

Der Äther.

magnetischen Weltbilde spielt. Beharrt er in absoluter Ruhe und ist der Ätherinhalt der bewegten Körper an deren Bewegung nicht beteiligt, oder im Gegenteile wird er durch sie mit fortgerissen und nimmt an ihrer Bewegung teil?

Einige Erscheinungen sprechen zunächst für die erste Anschauung, die des absolut ruhenden Äthers. Zu ihnen gehören hauptsächlich die astronomischen, nämlich die Aberration mit dem Ergänzungsversuch von Airy, der in dem Nachweis besteht, daß der Aberrationswinkel unabhängig ist davon, ob das Fernrohr mit Luft oder mit Wasser gefüllt ist, und nur abhängt von dem Verhältnisse der Bahngeschwindigkeit der Erde zu der des Lichtes; dann der Dopplereffekt. Für die zweite Anschauung des mitbewegten Äthers sprechen wieder Tatsachen, die darauf hinweisen, daß es keinen „Ätherwind" gibt, indem es bisher nicht gelungen ist, in irgendwelchen optischen und elektromagnetischen Versuchen den Einfluß der Bewegung der Erde auf deren Verlauf wahrzunehmen. Der Grundgedanke für diese Expe-

rimentaluntersuchungen läßt sich in der folgenden Weise charakterisieren: Man beobachtet eine optische oder elektrische Erscheinung, einmal bei einer Versuchsanordnung in der Richtung der Bewegung der Erde um die Sonne, dann in der entgegengesetzten oder in der darauf senkrechten. Ist der Äther ruhend, existiert also eine Erdbewegung gegen ihn, so müßte sich in den Zahlenwerten der Größen, welche die beobachtete Erscheinung bestimmen, eine Differenz erweisen. Doch alle Versuche, solche Differenzen herauszufinden, blieben bisher erfolglos.

Die H.A. Lorentzsche Kontraktionshypothese.

Wie ist nun der da auftauchende Widerspruch zu beheben? Zunächst nahm Lorentz von den beiden Grundanschauungen über die Beteiligung des Äthers an der Bewegung der Körper die erstere, die vom ruhenden Äther spricht, als die den experimentell festgelegten Tatsachen angemessenere an, und ergänzte sie, um auch den widersprechenden Beobachtungen gerecht zu werden, durch die folgende, ganz sonderbare Hypothese. Sie besteht in der Annahme, daß alle Dimensionen eines Körpers in der Richtung seiner Bewegung gegen den Äther in einem bestimmten, von seiner Geschwindigkeit abhängigen Verhältnisse verkürzt werden und nur in der zur Bewegung senkrechten ungeändert bleiben. Die Längenmessungen fallen daher anders aus, wenn sie in der Richtung der Erdbewegung, anders, wenn sie in der darauf senkrechten erfolgen. Nur merkt der Beobachter nichts davon, weil ja auch sein Maßstab in gleicher Art geändert wird. Das genügt aber noch nicht. Gleichzeitig muß eine ähnliche Änderung in der Auffassung der Zeit Platz greifen. Auch ihr Verlauf ist ein anderer für einen ruhenden Beobachter, ein anderer für einen mitbewegten, ohne daß beide den da auftretenden Unterschied merken, weil beider Uhren in gleicher Art an dieser Änderung beteiligt sind, selbst abgesehen von der der Entfernung der beiden Beobachter voneinander entsprechenden Differenz ihrer Ortszeiten. — Mit dieser Hilfshypothese überwand Lorentz die Schwierigkeiten, die sich einer einheitlichen Auffassung über die Rolle des Äthers in dem elektromagnetischen Weltbilde, ebenso wie in der Übertragung der Maxwellschen Grundgesetze von ruhenden auf bewegte Körper entgegenstellten.

Einsteins Theorie.

Die Lorentzsche Hypothese wurde jedoch in jüngster Zeit, 1905, durch den weitaus allgemeineren und widerspruchlosen Gedankengang Einsteins, der seiner Relativitätstheorie zugrundeliegt, entbehrlich gemacht. Ihm liegen zwei Aussagen zugrunde, und eine Zerlegung danach dürfte auch zu ihrer Darstellung am geeignetsten sein. Die erste Aussage erstreckt sich auf die Relativität der Bewegungen, die zweite auf die der Zeit, und beide vereint führen nach Minkowski zu einem neuen Weltbild, in dem Raum und Zeit in engster Abhängigkeit von- und untrennbar miteinander verbunden auftreten.

Die Relativität der Bewegungen.

Der ersteren gemäß stellt das neue Prinzip die Forderung auf, daß alle Koordinatensysteme, auf die in den physikalischen Lehren die Bewegungen der Körper bezogen werden, gleichberechtigt sein sollen, keines vor einem anderen irgendwie einen Vorzug haben dürfe. Für die Naturgesetze, die aus den Erscheinungen abgeleitet werden, sind daher nur solche sie erklärenden

Gleichungen als zu Recht bestehend anzusehen, die in allen möglichen Koordinatensystemen, sie mögen durch irgendwelche beliebige Substitutionen ineinander übergeführt werden, gleiche analytische Form besitzen oder, dies in der kurzen, aber prägnanten Sprechweise der Mathematik ausgedrückt, es sind nur solche Gleichungen zur Beschreibung der Naturerscheinungen heranzuziehen, welche beliebigen Substitutionen gegenüber, bei beliebigen Übertragungen also von einem Koordinatensystem in ein anderes, invariant bleiben. Die Erfahrung, welche sagt, daß, soweit unsere Beobachtungen reichen, stets alle Naturereignisse in gleicher Art erfolgen, ob sie sich in einer ruhenden oder einer bewegten Welt abspielen, verlangt diese Forderung ausnahmslos.

Die Galilei-Newtonsche Transformation.

Daß eine derartige Invarianz, d. h. Unveränderlichkeit der Form der Bewegungsgleichungen der Mechanik, in bezug auf geradlinige und gleichförmige Bewegungen besteht, weiß man schon von lange her. In ihr ist ja nichts anderes als das Gesetz der Trägheit enthalten, das zuerst von Galilei ausgesprochen wurde und nach Newton lautet: Die Materie besitzt das Vermögen zu widerstehen, deshalb beharrt jeder Körper, soweit es an ihm ist, in seinem Zustande der Ruhe oder der geradlinig-gleichförmigen Bewegung. Substitutionen daher, die einer derartigen Bewegung eines Körpers entsprechen, die sich als mit einer Verschiebung des Anfangspunktes des Koordinatensystems identisch erweist, es mag diese Verschiebung konstant oder gleichmäßig mit der Zeit anwachsen, müssen die für sie charakteristischen Gleichungen ihrer Form nach unberührt lassen. Sind sohin x, y und z die Koordinaten eines Punktes, bezogen auf ein willkürlich angenommenes Koordinatensystem; ξ, η und ζ die desselben Punktes für ein anderes, das aber mit dem ersteren parallele Achsen hat, so kann man setzen entweder

$$x = \xi + a_x, \quad y = \eta + a_y, \quad z = \zeta + a_z,$$

wo die Zeichen a_x, a_y und a_z irgendwelche der Zeit nach konstante Größen vorstellen, oder auch

$$x = \xi + v_x t, \quad y = \eta + v_y t, \quad z = \zeta + v_z t,$$

wo erst die v_x, v_y und v_z solche bedeuten, aber mit der Zeit t multipliziert eine geradlinig-gleichförmige Bewegung des Koordinatensystems bedingen, und wird finden, daß für beide die Bewegungsgleichungen ihre Form beibehalten. Diese Substitution wird die Galilei-Newtonsche genannt.

Die Drehungstransformation.

Wesentlich anders verhält es sich jedoch bei Drehungen. Schon Newton erkannte dies und gibt dieser Erkenntnis Ausdruck durch die Worte: „Die wirkenden Ursachen, durch welche absolute und relative Bewegungen voneinander verschieden sind, sind die Fliehkräfte von der Achse der Bewegung. Bei einer nur relativen Kreisbewegung existieren diese Kräfte nicht, aber sie sind kleiner oder größer, je nach Verhältnis der Größe der Bewegung.“ Er zählt die geradlinig-gleichförmigen Bewegungen zu den relativen, d. h. aus den Beobachtungen nicht ableitbaren, die drehenden zu den absoluten, weil an den durch sie hervorgerufenen Wirkungen der Fliehkraft erkennbar. Werden daher die Bewegungsgleichungen der Mechanik

nach dem Newtonschen zweiten Hauptgesetze (die Änderung der Bewegung ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und erfolgt nach der Richtung der geraden Linie, nach welcher jene Kraft wirkt) angeschrieben und auf sie jene Substitution angewendet, die einer Rotation um eine willkürliche Achse im Raume entspricht:

$$x = a_1\xi + b_1\eta + c_1\zeta,$$
$$y = a_2\xi + b_2\eta + c_2\zeta,$$
$$z = a_3\xi + b_3\eta + c_3\zeta,$$

wobei die Koeffizienten a, b, c Funktionen der Zeit sind und den bekannten Orthogonalitätsbedingungen genügen müssen —, so ändern sie ihre Form; sie sind dieser Substitution gegenüber nicht mehr invariant, und will man die Invarianz herstellen, so muß man gewisse Zusatzglieder hinzufügen. Diese stellen somit die Wirkung der Fliehkraft vor, die dadurch definiert erscheint als eine der Trägheit der Körper entspringende Widerstandskraft gegen die drehende oder allgemeiner gegen jede Art krummliniger Bewegung.

In beiden behandelten Fällen oder für beide Arten von Transformationen wurde aber die Zeit nicht mit in die Veränderung einbegriffen, gleichsam als ob sie — unbeeinflußt durch diese Bewegungen — unabhängig von allen Veränderungen derselben dahinfließt.

Die zweite Aussage Einsteins bezieht sich auf die Zeit. Sie fordert für sie die gleiche Relativität wie für die Bewegungen im Raume, nämlich ihre Abhängigkeit sowohl von dem Standpunkte wie von der Bewegung des Beobachters. Aber während diese dem Verständnisse keine größeren Schwierigkeiten bietet, als sie schon durch die von den Elementarschulen her in uns eingeimpfte Umwälzung von dem Ersatz der geozentrisch-Ptolemäischen durch die Kopernikanisch-heliozentrische Weltanschauung geläufig gemacht wird, wirkt jene mit ihrer ganz neuen Vorstellung über das Wesen der Zeit, die Zeitmessung durch unsere Uhren und die Unmöglichkeit der Erfahrung für die Gleichzeitigkeit zweier Erscheinungen verwirrender und bedeutet eine Umänderung unseres gewohnten Vorstellungskreises und eine Neuerung, gegen die die erwähnte gering und viel weniger revolutionär ist. Die Relativität der Zeit.

Worin besteht nun die neu aufzunehmende Relativität der Zeit? Gesetzt, es seien mehrere Beobachter auf der ruhenden Erde, die da ein Ereignis beobachten. Sie stellen ihre Untersuchung an und notieren die zugehörigen Zeitmomente. Die einzelnen Angaben werden nur um konstante Beträge voneinander abweichen, die gewissermaßen rein lokale Verschiebungen der wirklichen gegen eine einheitlich anzunehmende Erdzeit darstellen. Anders verhält es sich aber auf der bewegten Erde, anders, wenn angenommen wird, daß sich die Beobachter auf verschiedenen Weltkörpern befinden, die sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten in beliebigen Richtungen bewegen. Es gibt kein Mittel, um aus den gefundenen Daten die Gleichzeitigkeit der Erscheinungen herauszulesen, ebensowenig wären, wenn mehrere Ereignisse beobachtet würden, die einzelnen Zeitdifferenzen konstant. Was die Uhren

zeigen, ist lokale Zeit, ihr Gang ist veränderlich mit der Bewegung der Beobachter und ihre Angaben daher nicht direkt miteinander vergleichbar. Oder dies in die Sprache der Mathematiker übersetzt, definiert man in einem sonst beliebigen Koordinatensystem die Koordinaten eines Punktes durch x, y und z und fügt etwa als vierte Koordinate die Zeit t hinzu, nimmt ferner für ein anderes System als analoge Größen ξ, η, ζ und τ an, so sagt die Newtonsche Mechanik, daß, wenn in einem bestimmten Momente, den man dann als Nullpunkt der Zeitzählung wählt, $t = \tau = 0$ ist, für alle folgenden stets die Identität

$$t = \tau$$

gilt. Das scheint selbstverständlich zu sein, ist aber nach der Einsteinschen Lehre nicht richtig, denn die Zeitmessung ist, selbst wenn sie in beiden Systemen mit gleichen Uhren vorgenommen würde, doch eine verschiedene.

Die Gleichwertigkeit von Raum und Zeit.

Die Vorzugsstellung, die nach Newton der Zeit gegenüber der Raummessung eingeräumt wird, gebührt ihr nicht. Vielmehr haben beide gleichwertig in die die Naturgesetze darstellenden Gleichungen einzugehen und stellen eine einheitliche Mannigfaltigkeit von vier Dimensionen vor, die Raum-Zeit heißen möge, an Stelle ihrer früheren Trennung in zwei verschiedene von den Dimensionen drei und eins. Fortan sollen, wie Minkowski, der diesen Gedanken zuerst aussprach, sagt, Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Union beider soll Selbständigkeit bewahren.

Erstreckt sich sohin der Newtonsche Begriff der Relativität bloß auf rein räumliche Änderungen und damit in Verbindung auf reine Bewegungserscheinungen, oder in der mathematischen Darstellung auf Substitutionen, in denen nur die drei Koordinaten x, y und z des empirischen dreidimensionalen Raumes vorkommen mit völliger Isolierung der Zeit, so fordert die volle Einsteinsche Relativitätslehre demgegenüber die Invarianz der Bewegungsgleichungen für die vier Größen x, y, z und die Zeit t in gleicher Art als einander nach jeder Richtung hin gleichwertig und zusammengehörig. Nur muß die Koordinate t, damit sie in derselben Maßeinheit auftrete, wie es die x, y und z als Längenmaße sind, durch das Produkt ct ersetzt werden, in dem die Größe c eine Geschwindigkeit bedeutet und zunächst noch ganz unbekannt ist. Zu ihrer Bestimmung werde das Theorem vom ruhenden Äther benutzt, das sagt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes konstant und von jeder Bewegung der Lichtquelle unabhängig ist.

Die Lichtfortpflanzung.

Es seien im Raume (mit 3 Dimensionen) zwei Beobachter gegeben. Der eine ruhe und messe die Koordinaten beliebiger Punkte durch x, y und z sowie die Zeit durch t, der zweite bewege sich mit beliebiger Geschwindigkeit und finde für die Koordinaten derselben Produkte die Größen ξ, η und ζ und für die Zeit τ. In einem bestimmten Momente, wo sich beide Beobachter an derselben Stelle des Raumes (nebeneinander) befinden, welche Stelle als Anfangspunkt der beiden Koordinatensysteme, sowie die entsprechende Zeit, da sie nebeneinander liegen, als Nullpunkt ihrer Zählung an-

genommen werde, soll ein Lichtsignal abgegeben werden. Die entstehende Lichtwelle verbreitet sich kugelförmig. Der ruhende Beobachter wird finden, daß er stets im gemeinschaftlichen Zentrum der einzelnen sich ausbreitenden Kugeln liegt, deren Radien

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

sind, wenn c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes bedeutet, oder daß für ihn, wie man durch Quadrieren dieser Beziehung findet, die analytische Gleichung der Kugelwellen durch

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$$

gegeben ist. Zu genau dem gleichen Ergebnisse soll nun auch der zweite Beobachter kommen, trotz seiner Bewegung und seiner wachsenden Entfernung von der Lichtquelle, von der die Kugelwellen ausgehen. Auch für ihn werden alle Punkte, die das Lichtsignal nach der für ihn geltenden Zeit τ erreicht, auf einer Kugel liegen, deren Gleichung durch

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 - c^2\tau^2 = 0$$

ist. Die aus beiden Gleichungen folgende Identitätsbeziehung

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = \xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 - c^2\tau^2 = 0$$

nennt man die Gleichung der Lichtfortpflanzung.

Die imaginäre Zeitkonstante.

Sie lehrt ein Doppeltes. Erstens folgt aus ihr, daß die oben noch unbestimmt gelassene Größe c, die dazu dient, die Zeit t durch Multiplikation mit ihr in ein Längenmaß zu transformieren, mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes zu identifizieren ist. Sodann aber sagt sie, daß die vier Koordinaten x, y, z und ct, oder ξ, η, ζ und $c\tau$ doch nicht so gleichwertig sind, als es nach der Relativitätslehre Einsteins den Anschein hat, sondern daß die Zeitkoordinate ct mit ihrem negativen Quadrate, d. h. mit einem imaginären Werte, in diese Hauptgleichung eingeht. Damit erscheint die Zeit doch wieder vor den drei anderen Koordinaten, die den natürlichen Raum messen, bevorzugt und ihr eine Ausnahmestellung eingeräumt.

Zur Erzielung einer symmetrischen Form für alle Entwicklungen seien von nun ab die vier Koordinaten der raum-zeitlichen Mannigfaltigkeit mit x_1, x_2, x_3 und x_4 bezeichnet, die ersteren, x_1, x_2 und x_3, seien identisch mit den rein räumlichen x, y und z, die vierte, x_4, ist gleichzusetzen ict. Dann ist die Distanz eines beliebigen Punktes vom Anfangspunkte bestimmt durch

$$D = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2},$$

und ferner die Größe eines Linien- und Bogenelementes durch

$$ds = \sqrt{dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2},$$

welche Gleichungen als Verallgemeinerungen des für den dreidimensionalen Raum geltenden pythagoräischen Lehrsatzes gelten können. Endlich stellt die spezielle Relation $ds = 0$ die Gleichung der Lichtfortpflanzung vor.

Die Lorentz-Transformation.

Auf dieser Grundlage baut sich die neue Gravitationslehre Einsteins auf. Doch ehe die Behandlung dieser vorgenommen werde, möge vorerst

ein einfacheres Beispiel durchgeführt werden. Ihm mögen die folgenden Annahmen zugrunde liegen. Es seien x_1, x_2, x_3 und x_4 die vierdimensionalen Koordinaten eines Punktes in einem beliebig festgelegten Bezugssystem, ξ_1, ξ_2, ξ_3 und ξ_4 die analogen desselben Punktes für ein zweites System, zwischen beiden werde eine lineare Substitution vorausgesetzt, die sie ineinander transformiert, wobei aber die Bedingungsgleichung

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = \xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2 + \xi_4^2$$

gelte. Dann führen, wie die Rechnung lehrt, wie aber hier nicht weiter gezeigt werden kann, die Substitutionsgleichungen physikalisch genau auf die eigentümliche Anschauung, die, wie oben auseinandergesetzt wurde, als die Lorentzsche Kontraktionshypothese bezeichnet wurde. Sie sind daher als der mathematische Ausdruck dieser Hypothese aufzufassen und werden in diesem Sinne die Lorentztransformation genannt, sowie die auf sie aufgebaute Relativitätstheorie die spezielle heißt.

Die Einsteinsche Transformation.

Der Einsteinsche Gedanke reicht jedoch weit über diese einfache Substitution hinaus. Einstein setzt zwischen den zwei Koordinatengruppen der x und ξ eine Substitution mit Koeffizienten fest, die nicht mehr konstant, sondern als veränderlich und als Funktionen der Koordinaten selbst anzusehen sind. Sie sei in infinitesimaler Darstellung gegeben durch

$$\begin{aligned} dx_1 &= a_1 d\xi_1 + b_1 d\xi_2 + c_1 d\xi_3 + \mathfrak{d}_1 d\xi_4, \\ dx_2 &= a_2 d\xi_1 + b_2 d\xi_2 + c_2 d\xi_3 + \mathfrak{d}_2 d\xi_4, \\ dx_3 &= a_3 d\xi_1 + b_3 d\xi_3 + c_3 d\xi_3 + \mathfrak{d}_3 d\xi_4, \\ dx_4 &= a_4 d\xi_1 + b_4 d\xi_4 + c_4 d\xi_4 + \mathfrak{d}_4 d\xi_4. \end{aligned}$$

Durch sie transformiert sich der Ausdruck ds für das Linienelement

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

in die neue Form

$$\begin{aligned} ds^2 = {} & g_{11} d\xi_1^2 + g_{12} d\xi_1 d\xi_2 + g_{13} d\xi_1 d\xi_3 + g_{14} d\xi_1 d\xi_4 \\ & + g_{21} d\xi_1 d\xi_2 + g_{22} d\xi_2^2 + g_{23} d\xi_2 d\xi_3 + g_{24} d\xi_2 d\xi_4 \\ & + g_{31} d\xi_1 d\xi_3 + g_{32} d\xi_2 d\xi_3 + g_{33} d\xi_3^2 + g_{34} d\xi_3 d\xi_4 \\ & + g_{41} d\xi_1 d\xi_4 + g_{42} d\xi_2 d\xi_4 + g_{43} d\xi_3 d\xi_4 + g_{44} d\xi_4^2. \end{aligned}$$

In ihr addieren sich wohl wegen der Beziehungen $g_{12} = g_{21}$, $g_{13} = g_{31}$ usw. die Glieder $g_{12} d\xi_1 d\xi_2$ und $g_{21} d\xi_1 d\xi_2$ und entsprechend zu $2 g_{12} d\xi_1 d\xi_2$ usw. Doch sei hier die offene Form beibehalten aus einem Grunde, dessen Berechtigung sofort einleuchten dürfte.

Die Bewegungsgleichungen.

Als zu erfüllende Bedingung zieht Einstein das Trägheitsprinzip der klassischen Mechanik heran, nach dem jede kräftefreie Bewegung (im dreidimensionalen Raume) eine geradlinige und gleichförmig ist, verallgemeinert es aber, in Anlehnung an die Definition der geraden Linie als kürzester Entfernung zwischen zwei Punkten, für seine vierdimensionale Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit in die Bedingung, daß die Bahnlinie des kräftefrei sich bewegenden Punktes ein Extremwert des Weges zwischen zwei beliebig angenommenen festen Punkten sei.

Diese erste Bedingung liefert die Bewegungsgleichungen der neuen Mechanik. Sie sind natürlich nicht mehr so einfach wie die analogen der Newtonschen. Sondern sie enthalten Zusatzglieder von einem ziemlich komplizierten Bau, geradeso wie Zusatzglieder auftreten, wenn man die einfachen Newtonschen Gleichungen der kräftefreien Bewegung auf den Fall einer Rotation anwendet oder ihre Invarianz für die entsprechende Substitution herstellen will.

Die Feldgleichungen.

Außerdem sind auch noch Gleichungen abzuleiten, denen die Größen g in dem neuen Ausdruck für das Bogenelement ds zu genügen haben. Einstein findet sie nach mehrfachen mißglückten Versuchen, nach öfterem Hin- und Hertasten in gewissen, rein geometrischen Relationen, die auf Gauß, Riemann, Christoffel u. a. zurückgehen und allgemein beliebigen Substitutionen gegenüber invariant bleibende Eigenschaften einer vier- bzw. n dimensionalen Mannigfaltigkeit repräsentieren. Diese zweite Gruppe heißen die Feldgleichungen.

Durch beide Aufstellungen ist das Ziel, das Einstein vorschwebte, erreicht, seine Aufgabe in allgemeinster Weise gelöst. Er ist im Besitze von Gleichungen für kräftefreie oder rein aus der Trägheit der Materie entspringende Bewegungen, die beliebigen Substitutionen gegenüber invariant sind und daher die Forderung der allgemeinsten Relativität in bezug auf Raum und Zeit erfüllen. Er hat ferner ebensolche Invariante, d. h. demselben Prinzip genügende Feldgleichungen als Gleichungen, die für die Substitutionskoeffizienten bestehen und sie bestimmen. Es bleibt daher nur mehr die Frage zur Beantwortung übrig nach der physikalischen Bedeutung der durchgeführten Entwicklungen, der allgemeinen Substitution und der durch sie in die Bewegungsgleichungen neu hinzugekommenen Zusatzglieder.

Die nullte Annäherung.

Hierzu schlägt Einstein den Weg der sukzessiven Näherungen ein. Er meint, daß, wenn im allgemeinsten Fall das von ihm neu definierte Trägheitsfeld durch das System der unbekannten Größen

$$\begin{matrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44}, \end{matrix}$$

deren Zahl wegen der Relationen $g_{12} = g_{21}$ usw. 10 beträgt, bestimmt wird, sich für die Newtonsche Mechanik dieses System auf

$$\begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{matrix}$$

reduziert zufolge der Schreibweise

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2.$$

Durch diese Wertbestimmung der Größen werden beide Felder, das Newtonsche und das Einsteinsche, identisch. Einstein nennt die dadurch festgesetzte Annäherung die „nullte".

Die erste Annäherung.

Von ihr geht er zur „ersten" über durch die Annahme, daß einzig an Stelle von $g_{44} = -1$ zu setzen sei $g_{44} = -1 + \varphi$, wo φ die Unbekannte des Problems bedeutet, die als Funktion der vier Koordinaten x durch die Feldgleichungen zu bestimmen wäre, während alle anderen g ihre der nullten oder Newtonschen Näherung entsprechenden Werte 1 oder 0 beibehalten. Es zeigt sich nach Durchführung der Rechnung, und darin liegt das merkwürdige und überraschende Ergebnis des ganzen Gedankenganges und der bezüglichen Entwicklungen Einsteins, daß die Bewegungsgleichungen nunmehr ganz die Form erhalten, die man für sie nach der alten klassischen Mechanik unter Einführung der Newtonschen Gravitation als wirkenden Kraft erhält, daß ebenso die Feldgleichungen mit der Laplace-Poissonschen Gleichung übereinstimmen, der das Newtonsche Gravitationspotential genügt, kurz, daß die neu eingeführte Größe φ sich ganz so verhält wie dieses Potential.

Die zweite Annäherung.

Aber nun noch mehr. Führt man die zweite Näherung durch, indem man auch den anderen g-Größen Werte erteilt, und zwar den g_{11}, g_{22}, g_{33} solche, die sich nur um kleine Beträge von 1 unterscheiden, und ebensolche kleine den anderen $g_{12} = g_{21}$, $g_{13} = g_{31}$, $g_{23} = g_{32}$, während man immer noch die $g_{14} = g_{24} = g_{34} = g_{41} = g_{42} = g_{43} = 0$ annimmt, so ergeben sich neue Gleichungen, in denen zu den dem reinen Newtonschen Potential φ entsprechenden Gliedern Zusatzteile als Korrektionen hinzukommen. Faßt man sie als Störungsglieder auf, so bedingen sie eine säkulare Perihelstörung, die angewendet auf den Planeten Merkur gerade und fast bis auf die Sekunde genau den fraglichen Fehlbetrag in der Theorie dieses Planeten erreicht, dagegen auf die anderen Planeten und die Bewegung des Erdmondes bezogen nur unmerkliche, weit unter die aus den Beobachtungen konstatierbare Grenzen fallende Beträge liefert.

Theorie der Gravitation.

Ohne Einführung irgendwelcher hypothetischer Massen, ohne Einbeziehung irgendwelcher willkürlicher Konstanten, wie sie gerade die vielen künstlichen zur Erklärung der Gravitation aufgestellten Mechanismen notwendig machten, rein aus dem einzigen Erfahrungssatze heraus, nämlich dem Prinzipe der Invarianz der die Naturgesetze darstellenden Gleichungen, das streng genommen die letzte und allgemeinste Fassung des Galilei-Newtonschen Trägheitsgesetzes ist, die der elektromagnetischen Erklärung der Trägheit entspricht — wird das Gravitationsfeld definiert, und die neue Definition gibt sofort, was ein nicht hoch genug anzuschlagender Erfolg ist, eine volle Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung.

Das Wesen der Gravitation läßt sich danach in Zusammenfassung der bisherigen Auseinandersetzungen und aus ihnen gezogenen Schlüsse am besten wohl durch folgende Worte charakterisieren: Eine Gravitation im Sinne der alten Mechanik existiert nicht. Sie entsteht erst in dem Augenblicke und ist aufzufassen als ein Trägheitswiderstand dagegen, daß wir den

materiellen Körpern eine raum-zeitliche Bewegung allgemeinster Art aufzuzwingen versuchen. Ihr Auftreten ist also daran geknüpft, daß die Koeffizienten g oder, wie Einstein sie nennt, die einzelnen Gravitationspotentiale nicht konstante, sondern raum-zeitlich veränderliche Größen, d. h. Funktionen der vier Raum-Zeit-Koordinaten x_1, x_2, x_3 und x_4 sind. Etwa so, wie wir auch sagen: Die Fliehkraft eines Körpers existiert nicht. Sie entsteht erst in dem Momente, als, und ist daher aufzufassen als ein Trägheitswiderstand dagegen, daß wir dem Körper eine rotierende Bewegung oder eine krummlinige Bewegung allgemeinster Art aufzwingen wollen, aber eine solche, zu deren Bestimmung nur die drei rein räumlichen Koordinaten x_1, x_2 und x_3 herangezogen erscheinen, die Zeit als vierte Koordinate nicht direkt in Frage kommt.

Die Identität von Trägheits- und Anziehungsmasse.

Diese Auffassung über das Wesen der Gravitation zieht eine Konsequenz nach sich, auf die Einstein in seinen Entwicklungen besonderes Gewicht legt. Es ist dies der Satz von der Identität zwischen träger und schwerer Masse, über den er sich äußert, daß gerade das Bedürfnis, in ihn eine tiefere Einsicht zu erlangen, für ihn Veranlassung war zu der intensiveren Beschäftigung mit der Frage nach dem Wesen der Gravitation.

Schon Newton unterschied, wie bekannt, streng zwischen der Masse eines Körpers und seinem Gewicht. Jene erschien ihm als Wirkung der Trägheit, dieses als Wirkung der Erdanziehung. Aber er stellte durch viele Experimente, nämlich die Beobachtung der Schwingungsdauer von Pendeln aus verschiedenem Material fest, daß beide einander proportional sind. Bessel in Königsberg bestätigte dieses Ergebnis durch ebensolche Beobachtungen, für die es ihm gelang, eine Genauigkeit zu erzielen, die nur einen wahrscheinlichen Fehler von 1 : 100 000 der Schwingungsdauer der Pendel offen ließ. Eine noch größere Genauigkeit erzielte neuerdings (1890) Eötvös in Budapest, indem er an Stelle von Pendeln die empfindlichere Drehwage verwendet. Sie reicht an 1 : 10 000 000 heran, bis zu welcher Grenze nunmehr die Proportionalität zwischen träger und schwerer Masse experimentell festgelegt erscheint. Für Einstein wird sie aber zu einer vollen Identität. Denn sowie ein Zentrifugalfeld nichts anderes ist als ein Trägheitsfeld, verursacht durch eine dem bewegten Körper auferzwungene Rotation oder in mathematischer Richtung ausgesprochen, durch die ihr entsprechende Substitution im empirischen dreidimensionalen Raume, so verhält sich auch ein Schwerefeld wie ein Trägheitsfeld bezüglich einer Substitution allgemeinster Art, aber nunmehr in der vierdimensionalen Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit. Beide Felder müssen, sofern sie unter gegebenen Verhältnissen auf materielle Körper wirken, durch dieselbe Naturkonstante bestimmt sein, oder träge und schwere Masse sind identisch.

Die Krümmung des Raumes.

Doch reicht die Bedeutung der Einsteinschen Lehre weit über diese Analogie hinaus. Es ergibt sich dies aus der folgenden Überlegung. Die Relationen nämlich, die er zur Aufstellung der Feldgleichungen der Gravitationen benutzt — und die, wie S. 623 erwähnt, auf Gauß und Riemann

zurückgehen, — stellen gewisse invariante Eigenschaften einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit vor und bestimmen als solche deren Krümmungsverhältnisse. Während das Grundelement eines Euklidischen Kontinuums, die unendlich kleine Bogenlänge, durch

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

Die Krümmungsverhältnisse des Raumes.

definiert wird, erscheint in einem Raume von allgemeineren geometrischen Eigenschaften, besonders von anderen Krümmungsverhältnissen die gleiche Größe durch

$$\begin{aligned} ds^2 = {} & g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + 2g_{13}dx_1dx_3 + 2g_{14}dx_1dx_4 \\ & + g_{22}dx_2^2 + 2g_{23}dx_2dx_3 + 2g_{24}dx_2dx_4 \\ & + g_{33}dx_3^2 + 2g_{34}dx_3dx_4 \\ & + g_{44}dx_4^2 \end{aligned}$$

charakterisiert, in welcher Gleichung die Koeffizienten g_{ik} Werte haben, die mit dem Orte im Kontinuum sich ändern und aus denen nach bestimmten Rechenregeln diese Krümmungsverhältnisse abgeleitet werden können. So gilt, um einige Beispiele zu geben, in der Ebene als einer Euklidischen Mannigfaltigkeit zweier Dimensionen, wie in der Elementargeometrie gezeigt wird, die Beziehung $ds^2 = dx^2 + dy^2$,

dagegen auf einer Kugelfläche als einem zweidimensionalen Kontinuum von einer konstanten Krümmung, deren Größe dem Radius der Kugel gleichkommt, $ds^2 = d\varphi^2 + \cos^2\varphi\, d\lambda^2$,

wenn φ die geographische Breite und λ die Länge eines Punktes der Fläche bedeuten, und ein noch komplizierterer Ausdruck für eine ellipsoidische Fläche, wovon die Geodäten zu erzählen wissen, wenn sie mehrere über größere Gebiete der Erdoberfläche sich erstreckende Dreiecke miteinander zu verbinden haben.

Die Tatsache, daß in einem Gravitationsfelde ein solcher Ausdruck für das Bogenelement als die Distanz zweier unendlich naher Punkte sich als notwendig erweist, führt zu der Anschauung, daß die Einsteinsche Physik ihren Betrachtungen nicht mehr die einfachste Euklidsche Geometrie zugrunde legen darf, vielmehr annehmen muß, daß das Vorhandensein eines Gravitationsfeldes in der „Welt", wie man auch kurz nach Minkowski die vierdimensionale Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit nennt, eine von Ort zu Ort variierende Krümmung in ihr hervorruft, mindestens an jenen Stellen, wo Materie sich befindet. Die Gravitation erscheint damit in einer wesentlich anderen Beleuchtung wie vorher, als eine Folge der durch die Anwesenheit der Materie erzeugten Änderungen der Krümmungsverhältnisse des Raumes.

Die sphärische Krümmung des Raumes.

Zunächst nahm Einstein an, daß die Welt eine Mannigfaltigkeit sei, die im ganzen die einfache Struktur eines Euklidschen Raumes (Krümmung = o) besitze und nur da, wo Materie in ihr lagert, durch sie gewissermaßen in dieser ihrer natürlichen Krümmung gestört werde. Aber diese Annahme ließ sich nicht vereinen, weder mit der Vorstellung einer unendlichen Aus-

dehnung des Raumes mit einer nahe gleichförmigen Verteilung von Masse in ihm, noch mit der zweiten, den Beobachtungen auf Grund von Sternzählungen mehr entsprechenden, einer endlichen Insel im sonst unendlichen leeren Raum. Sie führte fast zu den gleichen Widersprüchen, die von Neumann und Seeliger, wie schon S. 607 erwähnt, nach den Grundsätzen der alten klassischen Mechanik aufgedeckt wurden. Erst die Annahme einer vollsphärisch gekrümmten Welt, die da, wo Materie in ihr eingebettet ist nur feinere Krümmungsunterschiede aufweist, etwa wie ein See, um wieder ein Beispiel einer zweidimensionalen Mannigfaltigkeit zu entnehmen, auf der Oberfläche der Erde im ganzen sphärisch gewölbt ist, außerdem aber infolge äußerer Einflüsse von Tausenden von Wellen durchsetzt wird, löste alle Widersprüche und brachte die ersehnte Übereinstimmung besonders mit dem bekannten Hauptergebnis der stellarastronomischen Beobachtungen, nach dem alle Sterngeschwindigkeiten im Raume im Durchschnitt von gleicher Größe sind, nämlich alle mit ihren 30—100 km in der Sekunde recht klein und gering gegenüber der Fortpflanzung des Lichtes, die 300000 km/sec beträgt. Die Welt ist mithin sphärisch gekrümmt, endlich, aber — trotz ihrer Endlichkeit — unbegrenzt.

Sowie es ehemals unseren Vorfahren wunderbar erschien, daß ein Mensch, der auf der kugeligen Erde fortwährend geradeaus geht, doch wiederum zu seinem Ausgangspunkte zurückkommt, so dürfte es vielleicht einmal geschehen, daß die Menschen von der Erde weg in den Sternenraum eindringen werden, um nach langer Wanderung durch ihn ebenso wieder auf die Erde zurückzugelangen. Aber fragt es sich, was hat man unter einer solchen Wanderung in unserer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit zu verstehen, in der die drei rein räumlichen Koordinaten der einen zeitlichen gleichwertig gegenüberstehen? Bezieht sie sich bloß auf die in jedem Zeitmomente ($x_4 =$ const) aus der Welt ausgeschnittene dreidimensionale, wirklich räumliche Mannigfaltigkeit, deren Endlichkeit wohl damit verständlich erscheint, während die vierte oder Zeitkoordinate x_4 doch unendlich werden kann? Oder erstreckt sich diese Endlichkeit auch auf sie, so daß sie in sich zurückkehrt und einen ununterbrochenen Kreislauf darstellt? Fragen solcher Art drängen sich auf, aber zunächst steht die Antwort auf sie noch in weiter Ferne. Trotzdem wollen wir sagen: *Veniet tempus, quo posteri nostri tam aperta nos nescisse mirentur.*

Die Krümmung der Lichtstrahlen.

Mit der Tatsache der Krümmung des Raumes ist, wie Einstein weiter ausführt, als ein neues Ergebnis von fundamentaler Wichtigkeit eine gleiche Krümmung der Lichtstrahlen verknüpft, da für deren Fortpflanzung nicht mehr die einfachen, aus der Euklidschen Geometrie fließenden Bewegungsgleichungen gelten, sondern jene, die dem komplizierteren, durch die einzelnen Gravitationspotentiale g bestimmten Ausdruck für das Bogenelement entsprechen. Wo die Euklidsche Geometrie noch halbwegs als zutreffend angesehen werden kann, bewegt sich das Licht geradlinig, wie dies ja von alters her bekannt ist. Kommt aber ein Lichtstrahl in das Gravitationsfeld

eines Körpers, der stark genug ist, um eine größere Störung der Krümmungsverhältnisse des Raumes an dieser Stelle hervorzurufen, so muß er sich dieser Störung fügen, mithin eine krummlinige Bahn beschreiben, geradeso wie ein geschleuderter Stein im Gravitationsfeld der Erde seine krummlinige parabolische Wurfbahn beschreibt. Einstein berechnete, daß die Sonne Masse genug besitze, um in dieser Hinsicht den merklichen und daher den Messungen zugänglichen Betrag von 1″.7 zu erzeugen, und machte dann die folgende Prophezeiung: Man beobachte einmal die Richtung, von der das Licht eines Sternes zu uns kommt, wenn es knapp an der Sonne vorbeistreicht, der Stern daher uns in deren Nähe zu stehen scheint, und sodann dieselbe Richtung, wenn die Sonne wiederum weit weg von ihm sich befindet. Zwischen beiden muß sich je nach der scheinbaren Entfernung des Sternes von der Sonne eine maximale Differenz von 1″.7 zeigen. Aber eine solche Beobachtung ist nur bei Gelegenheit einer Sonnenfinsternis möglich, da ja sonst Sterne, die mit ihr nahe an demselben Punkte des Himmels stehen, nicht sichtbar sind. Die Sonnenfinsternis vom 29. Mai 1919 bot eine passende Gelegenheit, um diese Prophezeiung Einsteins auf ihre Richtigkeit zu prüfen, und ihr Ergebnis war deren glänzende Bestätigung, ein Erfolg, der in seiner wissenschaftlichen Bedeutung an die von Bessel geahnte Existenz, von Leverrier durchgeführte Berechnung des Planeten Neptun und dessen Entdeckung durch Galle 1846 heranreicht.

Die Verschiebung der Spektrallinien.

Eine weitere Prophezeiung Einsteins bezieht sich auf kleine Verschiebungen der Linien in den Spektren der Fixsterne und natürlich auch der Sonne gegenüber ihrer Lage in den auf der Erde erzeugten. Sie werden hervorgerufen durch den Übergang des Lichtes von einem Gravitationsniveau, wie es Sterne und Sonne vorstellen, in das niedere der Erde. Doch sind diese Verschiebungen sehr klein. Sie liegen fast schon unterhalb der Grenze dessen, was heute die Astronomen selbst mit ihren Riesenhilfsmitteln der Beobachtung, beispielsweise mit dem mächtigen Gitterspektroskop an dem ebenso mächtigen 50 m-Turmteleskop der Mt.-Wilson-Sternwarte leisten können. Weder diese direkten Arbeiten, noch auch statistische Untersuchungen, die zu ihrer Ableitung aus Linienmessungen bei einer sehr großen Zahl von Sternen unternommen wurden, brachten bisher mit aller Strenge die erwartete Bestätigung. Wie nicht zu zweifeln, dürfte wohl auch hier der Erfolg nicht ausbleiben; für uns erübrigt nur der Trost, der in den Worten Senecas liegt: *Contenti simus inventis, aliquid veritati et posteri conferant.*

Literatur.

Die Geschichte der Gravitationslehre seit Newton (ihre Vorgeschichte findet sich am besten behandelt in dem Buche: FERDINAND ROSENBERGER, Isaak Newton und seine physikalischen Prinzipien [Leipzig 1895, F. A. Barth]) fällt fast vollständig zusammen mit der Entwicklungsgeschichte der Mechanik. Ihre Darstellung ist daher zum größten Teile in dem schönen Artikel von E. WIECHERT, Die Mechanik im Rahmen der Physik, Band Physik der Kultur der Gegenwart, enthalten und bedarf nur einer Ergänzung und breiteren Ausführung im Hinblicke auf die besondere Berücksichtigung rein astronomischer Fragen. Ein spezielles zusammenfassendes Werk hierüber ist zwar nicht vorhanden, aber doch vielfach kleinere Arbeiten und Referate, von denen besonders zu erwähnen wären: das Referat von P. DRUDE, Über Fernwirkungen, in den Ann. der Physik und Chemie, Band 62 (1897), der Artikel von J. ZENNECK, Gravitation, in Band V 2 der Enzyklopädie der math. Wissenschaften, und des Verf. eigene vorbereitende Arbeiten zu dem Artikel: Kritik des Newtonschen Gravitationsgesetzes, der für Band VI derselben Enzyklopädie bestimmt ist und 1921 erscheinen dürfte. Eine populäre Darstellung gibt des Verf. Büchlein in der Sammlung „Aus Natur und Geisteswelt" (Leipzig, B. G. Teubner): Das astronomische Weltbild im Wandel der Zeit, I. Teil, 3. Auflage. Vom Altertum bis zur Neuzeit, II. Teil, 2. Auflage. Moderne Astronomie.

Viel reichhaltiger ist die Literatur, sowohl die wissenschaftliche wie die populäre, über die Relativitätslehre Einsteins, trotz ihrer Jugend. Die klassische Arbeit EINSTEINS, mit der sie begann, erschien 1905 in den Ann. d. Phys. Band 17, die weiteren Arbeiten teils in denselben Annalen, teils in den Berichten der Berliner Akademie der Wissenschaften. Von populären oder zusammenfassenden Arbeiten zu Einsteins Lehre seien hier erwähnt: die von ihm selbst herrührende: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, gemeinverständlich, in der Sammlung Vieweg (Braunschweig 1917), sodann die von E. FREUNDLICH, Die Grundlagen der Einsteinschen Gravitationslehre (Berlin 1917, J. Springer); ferner Dr. FR. BEER, Die Einsteinsche Relativitätstheorie und ihr historisches Fundament, sechs Vorträge für Laien (Wien 1920); für ein eingehenderes Studium, aber nur für mathematisch durchaus gebildete Leser sei das Buch H. WEYL, Raum, Zeit, Materie (Berlin 1918, J. Springer) empfohlen.

Literatur zu den einzelnen Abschnitten.

II. Die Arbeiten Leverriers erschienen in den „Annales de l'observatoire de Paris, mémoires, und zwar Band 4 (1858) Erde bzw. Sonne, Band 5 (1859) Merkur, Band 6 (1861) Venus und Mars, Band 12 (1876) Jupiter und Saturn, Band 14 (1877) Uranus und Neptun. Die umfassenden Arbeiten Newcombs und Hills sind enthalten in Washington Astron. Papers, prepared for the use of the American Ephemeris and Nautical Almanac, und zwar Band 6 (1898) Tables of the four inner planets, Band 7 (1898) Tables of Uranus and Neptun und 7 (1898) Tables of Jupiter and Saturn. Sie fanden ihren Abschluß in dem kleinen Büchlein: The Elements of the four inner planets and the fundamental constants of the Astronomy (Washington 1895).

III. Die historischen Beispiele sind entnommen der Mécanique céleste von P. S. Laplace, Tome 4. Zur Merkurtheorie ist maßgebend das Referat von J. BAUSCHINGER, Untersuchungen über die Bewegungen des Planeten Merkur (München 1884). Die Arbeit von SEELIGER, Das Zodiakallicht und die empirischen Glieder in der Bewegung der inneren Planeten, erschien

(München 1906) in den Berichten der bayerischen Akad. d. Wiss.; die „Über die Unmöglichkeit der Ausdehnung des Newtonschen Gesetzes auf die unendliche Welt" in den Astr. Nachr. Band 137 (1895) und in den Ber. der bayer. Ak. der Wiss. (1896).

Eine Geschichte des Enckeschen Kometen gibt J. HOLETSCHEK, Über die Bewegungs- und Helligkeitseigentümlichkeiten des Enckeschen Kometen, in dem Astron. Kalender der Wiener Sternwarte (1915).

Zur Mondtheorie wären noch zu erwähnen: F. TISSERAND, Note sur l'état actuel de la théorie de la lune, in dessen Méc. céleste Band III (1894), dann, außer den zahlreichen Arbeiten Newcombs, gewissermaßen als deren Abschluß, sein Vortrag vor dem internationalen Kongreß der Mathematiker in Rom 1908: La théorie du mouvement de la lune, son histoire et son état actuel; endlich der Artikel von E. BROWN, Theorie des Erdmondes, in Band VI 2 der Enzykl. der math. Wissenschaften.

Über Flutreibung siehe besonders G. H. DARWIN, Ebbe und Flut, sowie verwandte Erscheinungen im Sonnensystem, übersetzt von AGNES POCKELS (Leipzig 1902, B. G. Teubner).

Die Abhandlungen BOTTLINGERS und DE SITTERS über die Absorption der Gravitation bei Mondfinsternissen erschienen die ersteren in den Ber. der bayer. Akad. (1912, 1918), die zweite in den Proceedings der Akademie von Amsterdam (1912).

IV. Hierzu ist besonders das schon vorher zitierte Referat von P. DRUDE, Über Fernwirkungen, hervorzuheben, das auch sonst alle Literaturnachweise bringt.

Der Vortrag von PAUL DU BOIS-REYMOND erschien in der „Naturwissenschaftlichen Rundschau" Band 3: Über die Gravitation. Eine Entgegnung auf ihn, „Über die Fernkraft und das durch Paul du Bois-Reymond aufgestellte dritte Ignorabimus" gab C. ISENKRAHE (Leipzig 1889, B. G. Teubner).

V und VI. Die umfassende Literatur über die Elektronentheorie von H. A. LORENTZ und die Relativitätstheorie von A. EINSTEIN einzeln anzuführen, ist heute fast schon unmöglich. Von zusammenfassenden Arbeiten seien zu erwähnen und wurden auch in dem vorliegenden Artikel zu Rate gezogen: H. A. LORENTZ, Considerations of Gravitation. Proceed. of Acad. of Amsterdam (1900); M. LAUE, Das Relativitätsprinzip (Braunschweig 1911); A. EINSTEIN selbst, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie (Leipzig 1916, J. A. Barth); dann die Darstellung in CHWOLSONS Lehrbuch der Physik, Band 4. 2. Hälfte (Braunschweig 1913), die Bearbeitungen von MAX BORN, Einsteins Theorie der Gravitation und der allgemeinen Relativität, in der Phys. Zeitschrift Band 17 (1916); ferner von FR. KOTTLER, Über die physikalischen Grundlagen der Einsteinschen Gravitationstheorie, Ann. der Physik Band 56 (1918) und W. DE SITTER, On Einsteins Theory of Gravitation and its astronomical consequences, in den Monthly Notices of the Royal Astron. Society (1916—1918).

NAMENREGISTER.

A

Abbe 579
Abbot 335, 360, 372
Adams, J. 250, 609
— W. S. 349, 399, 401, 411 f., 421, 444, 480, 488, 498, 507 ff., 529
Airy 250, 547, 616
Aitken 420, 421, 424
Albategnius = Al Batani 32, 142, 212
Albertus Magnus 44
Albrecht, Seb. 454, 509
— Theodor 132, 176
Alexander der Große 182
Alfons X. von Kastilien 217
Alfraganus 212
Al Mamun 188
Al Sûfi 148, 566
Ambronn 128, 137, 138, 175, 176, 566
Anaxagoras 17, 32, 33, 34
Anaximander 30, 31, 182
Anaximenes 31, 34
André 315
Andrews 365
Ångström 339
Antoniadi 276
Apelt 209
Apollonius 35, 178
Arago 315
Aratus 21, 38
Archilochos 29
Archimedes 38, 183
v. Aretin 429, 508
Argelander 152, 378, 395, 449, 534, 538, 547
Aristarch 29, 30, 33, 36, 37, 39, 204, 215, 218, 221, 511
Aristophanes 17
Aristoteles 17, 30, 32, 35, 183, 216, 233, 239, 306
d'Arrest 250
Arrhenius 52, 313, 315, 369
Assurbanipal 42, 47
v. Auwers 151, 155, 519, 602, 606
Auzout 575

B

Baade 457, 509
Bach 91
Baco, Roger 44
Baeyer 192, 213
Bailey 473
Bailly 209
Baily 150, 343
Baker 421, 456, 457, 508
Bakhuizen 142
Ball, L. de 137, 176, 260
Barnard 277, 279, 442, 483 ff., 507 ff.
Bartoldi 273
Bartsch 150
Bassermann-Jordan 137
Battermann 176
Bauschinger 260, 629
Baxandall 459
Bayer, Joh. 147
Becker, L. 479, 509
Beda Venerabilis 185
Beer 269, 273, 316, 629
Bell 509
Belopolsky 270, 428, 459, 508
Benzenberg 252
Bergstrand 388, 397
Bernewitz 420 ff., 434, 508
Berossos 29, 33, 43, 118
Bessel 151, 170, 193, 194, 199, 213, 248, 312, 517 ff., 522, 524, 538, 571, 602, 625, 628
Bezold 54 ff.
Bianchini 268, 315
van Biesbroeck 420
Bilfinger 53, 137
Biot 54
Bode 146, 160
Börsch 213
Boguslawski 260
Bohlin 508, 509
Bohr 401, 407, 416, 510
Boll 1, 54
Bolte 176
Bond 301, 303
Borelli 239
Born 630
Bosler 372
Boss 420, 510, 519, 548, 556
Bottlinger 399, 502, 508, 510, 609, 630
Bouguer 190, 197, 212
Bourget 485, 505, 509
Bouvard 248, 601
Bowyer 420
Bradley 142, 150, 512, 517, 602
Brandes 252
Braun, J. 125, 352
Brendel 313, 317, 507
Breusing 175, 176
Brill 384, 507
Brorsen 258
Brown 603, 630
Brünnow 176
Bruns, H. 498, 573
Buchholz 260
Buchwald 387
Bürgi 121, 149
Buffon 605
Buisson 417, 485, 505, 508, 509
Bunsen 337
Burchell 437
Burnham 154, 431
Burwell 349
Butler 509

C

Caesar, Julius 6, 75
Cäsaris 160
Campani 575
Campbell 421, 428, 431, 443, 485, 487 ff., 491, 508 ff., 549, 556
Camus 190
Cannon 381, 400 f., 421, 508
Cantor 55
Carpenter 316
Carrington 333
Caspari 176
Cassegrain 576, 577
Cassini, J. D. 189, 268, 273, 289, 301, 303, 304, 364
— Jacques 189, 212, 268
Celsius 190
Censorinus 71
Chambers 317
Chandler 428, 508
Chapman 542
Charlier 247, 260, 382, 507, 542, 558, 560
Charlois 236
Chaulnes, Herzog von 569
Chauvenet 176
Christoffel 623
Chwolson 630
Clairaut 190, 233, 605
Clark, Alvan 297, 602
Clarke 193
Clausius 291
Clavius 343
Clerke 315
Coblentz 386, 387, 508
Cohn, F. 137
Comstock 420, 508, 548
Condamine, de La 190, 197, 212
Cornu 339
Cortie 509
Courvoisier 428, 508
Crawford 421
Crump 421
Curtis 478, 481, 482, 488, 509, 516
Curtiss 421, 508
Cusanus 120, 149, 567

D

Dante 18, 47
Darwin, G. H. 108, 137, 316, 510, 630
Davis 158, 345
Debye 508
Delambre 101, 120, 190, 209, 214
Delaunay 603, 609
Demokritos 34, 36, 73, 530
Denning 282
Descartes 227, 610

Deslandres 286, 305, 350, 353, 371, 372
De Vico 269
Diels 55
Diodor 28
Dionysius Exiguus 84
Divini 575
Doberck 420, 432, 508
Dörfel 239
Dollond 577
Domke 176
Donati 311
Doppler 353, 416
Dreyer 52, 154
Drude 629, 630
Du Bois Reymond, Paul 614, 630
Duncan 510

E

Earnshaw 122
Eberhard 391, 485, 509
Ebert, H. 503, 504
Eddington 367, 408, 424, 494, 495, 497, 498, 501, 508, 510, 553
Einstein 416, 616ff., 629, 630
Ekphantos 35, 36, 218
Elger 316
Ellerman 508
Elster 507
Emden 367, 369, 510
Empedokles 33
Encke 303, 608
Eötvös 625
Epikur 37
Epping 54
Eratosthenes 34, 142, 186, 187, 212
Eudoxus 16, 30, 35, 38, 141
Euler 233, 246, 577
Evans 508
Everett 508
Evershed 335, 417, 440, 441, 508, 509

F

Fabricius, David 434
— Johann 324
Fabry 200, 417, 485, 505, 508, 509
Fagerholm 509
Faraday 611
Fargis 127
Fath 470, 480, 509
Fayet 260
Fechner 18
Fernel 188, 212
Fizeau 321
Flammarion 316
Flamsteed 148, 150, 285, 512, 517, 567
Fleming, Sandford 131
— W. P. 482
Fleury 173
Flotow 177
Foerster 134, 213
Fontana 273, 281
Forkes 252
Foucault 578, 579
Fowle 360
Fowler 355, 407, 508
Frankland 340, 345, 365
Franklin-Adams 539
Franz 316
Fraunhofer 337, 578, 594
Freundlich 390, 629
Frost 420, 438, 485, 507, 509
Furner 420

G

Galilei 9, 39, 50, 120, 121, 227, 261, 290, 298, 324f., 513, 530, 574, 618
Galle, J. G. 250, 320, 602, 628
Gambey 569
Gassendi 302
Gauß 191, 213, 236, 247, 573, 623
Geitel 507
Geminos 73
Gerland 137
Gill 396
Ginzel 57, 91, 137
Giordano Bruno 18, 50
Godin 190
Goethe 8, 49, 50, 100, 324
Goos 421
Gould 152, 192, 395, 540
Gouy 369
Graff 261, 378, 380, 507
Graham 123
Green 509
Gregor XIII. 86
Gregory 576, 577
Grimaldi 149, 289
Günther 210, 316
Güßfeldt 176
Guthnick 373, 386, 507ff.
Gyldén 498
Gyllenberg 550

H

Hadley 159
Hagen 127, 388, 397, 450, 500, 507ff.
Hale 277, 350, 353, 357, 358, 368, 371, 485, 508, 593
Hall 297, 607
Halley 146, 149, 150, 239, 320, 437, 514, 546, 599, 604
Halm 510, 544
Halma 210
Hammurabi 67
Hansen 162, 176, 207, 573, 603
Hansky 327
Hardcastle 509
Harding 151
Harkness 355
Harpalos 73
Harper 421, 433
Harrison 122, 123, 161
Hartmann 92, 316, 378, 380, 384, 394, 416, 428, 443, 457, 485, 489, 491, 507f., 580
Hartwig 154, 482, 509
Hayford 193, 194, 213
Hayn 316
Heiberg 54, 56, 209, 210
Hell 146
Hellerich 421, 429, 508, 510
Helmert 193, 194, 213
Helmholtz 362, 493
Henlein 121
Henroteau 431, 508
Henry 508
Hepburn 508
v. Hepperger 215, 260, 614
Heraklit 1, 35, 39, 218
Herodot 97
Herschel, Caroline 150
— Wilhelm 154, 268, 285, 301, 305, 334, 378, 430, 533, 535, 536, 546
— John 154, 437, 536
Hertz 612
Hertzsprung 383, 388, 391, 397, 405, 407, 408, 414, 428, 431, 461, 470, 476, 486, 497, 507ff., 556
Herz, N. 260
Hesiod 29, 62
Hevelius 149, 239, 289, 290, 316, 436, 569, 575
Heyde 570
Hiketas 35, 36
Hill 601, 603, 629
Hillebrand 260
Hind 491, 510
Hindley 569
Hinks 320, 509
Hipparch 29, 30, 32, 33, 35, 43, 70, 109, 143, 147, 157, 204, 205, 216
Hippodamos 13
Hirn 304
Hnatek 421
Holetschek 260, 317, 630
Homer 2, 17, 29, 96
Hook 569
Hooke 121
Hoppe 55, 209
Hough 554
Houzeau 175, 536
Hubble 492, 510
Hügeler 549
Huggins 311, 327, 386, 416, 443, 463, 508
Hull 312
Humboldt 315
Huygens 121, 189, 198, 227, 273, 301, 302, 531

I

Ibn Junis 32, 120
Ideler 54, 91
Innes 424, 508, 516
Inon 190
Isenkrahe 630

J

Janssen 327, 347, 352
Jeans 500, 501, 510
Joel 5
Jordan 421, 425, 508
Joy 411, 413, 508
Julius 370

K

Kalippus 70
Kant 103, 530, 531, 600
Kapteyn 396, 445, 509, 524, 529, 542, 552, 558
Kayser 378, 380, 507, 510
Keeler 305, 478, 481, 484, 485, 489, 509, 562
Kepler 40, 45, 149, 160, 179, 208, 223, 239, 290, 307, 312, 343, 436, 531
Kidenas 29, 33
Kienle 510
King, A. S. 354
— E. S. 398, 413, 508, 545
Kirch 146
Kirchhoff 337f.
Kleanthes 39
Kleiber 555
Klein, F. 137
— H. J. 315
Kleomedes 184, 343
Klinkerfues 260, 502
Knox Shaw 492, 510
Kobold 511, 551
Koch 387, 390, 508
Köppen 335
Kohl 508
Kohlschütter 401, 414, 494, 508, 510, 525

Kolumbus 157
Konen 510
Kopernikus 36, 178, 307
Kopff 507, 509
Kosmas Indopleustes 185
Kostinsky 509
Kottler 630
Kron 507
Krüger, Adalbert 152, 395, 538
— Friedr. J. 154, 397
Ktesibios 119
Küstner 151, 170, 176, 322, 396, 509
Kugler 27, 54, 67

L

Lacaille 149, 150
Lagrange 142, 247, 604
Lahire 189, 289
Lalande 150, 538
Lamansky 360
Lambert 246, 532
Langley 359, 360
Langrenus 289
Laplace 176, 247, 285, 304, 601, 604, 605, 610, 614, 629
Lassell 305
Lau 413, 509
Laue 493, 508, 510, 630
Leavitt 466, 473, 509
Lebedew 312, 369
Legendre 191
Lehmann Filhés 614
Leiner 449, 509
Leithäuser 387
Lemonnier 190, 602
Leverrier 249, 322, 420, 508, 601, 602, 628, 629
Lilius 86
Lindblad 389, 397 f., 413, 470, 480
Lindemann 386, 507
Listing 191, 213
Littrow 540
Lockyer 53, 340, 345, 347, 353, 365, 400 f., 405, 409, 497, 508
Loewy 316, 331
Lohrmann 290
Lohse 315, 316, 352, 420, 502, 593
Lorentz 616, 617, 630
Loria 55
Lowell 270, 276, 286, 316
Lubieniecki 317
Ludendorff 56, 409, 421, 424, 447, 451, 458, 459, 489, 492, 501, 507 ff.
Lukrez 2, 37
Lummer 361
Lundmark 470, 480, 509
Lunt 439, 441, 509

M

van Maanen 481, 483, 488, 509
Macrobius 215, 530
Mädler 209, 269, 273, 280, 315, 316, 534
Mästlin 223
Maggini 509
Manilius 49, 307
Manitius 54, 55, 210, 215
Maraldi 189, 273
Marcuse 176
Martin 509
Maskelyne 160, 519
Matzka 91
Maupertuis 190, 197, 212
Maury 400 ff., 508
Maxwell 303, 304, 312, 316, 369, 612
Mayer, Robert 362
— Tobias 151, 161, 290, 430, 602, 604, 605
Méchain 190, 214
Mecking 335
Melanchthon 45
Melotte 542
Merrill 451
Meton 70, 73, 76
Metrodoros 530
Meyer, Edgar 507
— M. W. 315
Michelson 200, 215, 509
Minkowski 617, 620, 626
Minschin 385, 507
Möller, J. 260
Moore 421, 485, 487, 488, 509, 510
Morvan, L. 316
Müller, G. 154. 279, 315, 378, 380, 389, 506 ff.
Münch 389, 508
Münster, Seb. 118

N

Nasmyth 316
Nechepso 43
Neison 316
Neumann, C. 607, 627
Newall 440, 441, 509
Newcomb 142, 163, 176, 260, 315, 369, 503, 509, 510, 519, 601 ff., 629
Newton, A. 257
— Isaak 180, 189, 226 f., 239, 245, 576, 598, 607, 610, 611, 620, 625
Nicetas 218
Nichol 386, 505
Nichols 312
Nicholson 443, 505, 509, 510
v. Nießl 260
Nijland 259, 448, 509
Nissen 13, 53
Nörlund 420, 431, 508
Nort 542

O

Örtling 570
Öttinger 210
Oinopides 73
Olbers 129, 246, 543
Oppenheim 52, 260, 559, 598, 629.
Origenes 18
Osthoff 387, 397, 398, 508
Outhier 190
Ovid 19

P

v. der Pahlen 479, 509
Palisa 153, 236
Pandorus 84
Parkhurst 382, 396, 398, 438, 507, 508
Parmenides 31, 33, 183
Pavel 420, 421, 430, 434, 508
Pease 444, 480, 481, 486, 509, 510
Perikles 33
Perot 200
Perrine 445, 478, 481, 509, 510
Peter 315
Peters, C. A. F. 143, 602
— C. H. 153
Petosiris 43
Pfund 386, 387, 508
Phillips 450
Philolaos 35, 36, 218
Piazzi 236
Picard 180, 212, 227
Piccolomini 147
Pickering, E. C. 378, 379, 380, 391, 392, 396, 432, 450, 489, 508 f., 540
— W. H. 252, 260, 484, 509
Pingré 317
Plana 176
Planck 388, 389, 414
Plaskett 421
Plaßmann 315, 448
Platon 17, 30, 32, 39, 183, 221
Plinius 137, 201
Plummer 421, 501, 508 ff.
Plutarch 71, 343
Pogson 377, 448
Pohl 507
Pohle 315
Poincaré 260
Poor 508
Posidonius 18, 30, 34, 38, 49, 139, 187, 205, 215, 343
Prager 421, 426, 508 ff.
Prey 260.
Pringsheim 318, 372, 508
Pritchard 380
Proctor 550
Prodikos 6
Proklos 30, 33, 50
Ptolemäus 17, 30, 32, 35, 43, 96, 119, 147, 148, 178, 184, 185, 187, 192, 206, 210, 217, 307, 377, 546
Puisseux 316
Pulfrich 384
Pythagoras 19, 216
Pytheas 9

R

Ramsay 340
Ramsden 569
Reese 421
Regiomontanus 157, 160, 175, 307
Reichenbach 570, 594
Reinhold 221
Reitz 173
Repsold 127, 175, 570, 581, 585, 594
Reynolds 509, 510
van Rhijn 529
Riccioli 149, 289, 290, 432
Richer 189, 599
Riefler 122
Riemann 623
Ritchey 445, 481, 482, 509
Ritter 210, 493, 510
Roberts 492
Roche 304
Römer, O. 125, 321, 524
Rohrbach 147
Roller 260
Ronsard 45
Roscoe 353
Rosenberg 378, 380, 382, 385, 389, 390, 507 ff.
Rosenberger 629
Ross 5
Rothmann 149
Rowland 339
Rubens 387

Rühl 87
Russell 408, 409, 420, 496 ff., 508 ff., 557

S

Sacrobosco 186, 211
Saegmüller 570
Saint-Hilaire 166
Sanford 487, 509
Sartorius 209
Saunder 316
Schäberle 602
Schaefer 210
Schaubach 209
Scheiner, Christoph 289, 324, 325, 589
— Julius 315, 383, 389, 412, 484, 507 ff.
Schiaparelli 29, 54, 55, 211, 255, 260, 265, 269, 270, 274, 315, 430, 540
Schlesinger 428, 429, 457, 508
Schmidt, August 366
— J. 290, 316, 387
Schoenberg 380, 507
Schönfeld 152, 395, 538, 550, 559
Schott 579
Schram 87
Schreiber 573
Schröter 265, 268, 290, 315, 316
Schwabe 332
Schwarzschild 366, 383, 384, 388, 392, 396, 454, 494, 507 ff., 529, 553, 558
Scotus, Michael 44
Seares 389, 399, 476, 480, 507 f.
Secchi 327 f., 345, 351, 352, 354, 355, 365, 372, 400 f.
Sécretan 570
v. Seeliger 259, 260, 304, 316, 430, 445, 499, 502, 503, 508 ff., 540 ff., 557, 606, 607, 627, 629
Seleukos 9, 36
Selga 421
Seneca 239, 307, 628
Sestini 397
Shapley 409, 454, 456, 457, 462, 464, 466, 469, 474 ff., 480, 482, 501, 508 ff., 561
Simplicius 36
de Sitter 609, 630
Slipher 270, 472, 478, 480, 481, 492, 509 f.
Snellius 188, 212
Solon 73
Sommerfeld 137
Spence 387
Stark 416
Stebbins 385, 386, 456, 460, 507, 509
Steele 424, 508
v. d. Steinen 20, 22
Steinheil 580
Stetson 387, 508
Stewart 331
Stockwell 235, 260
Stöffler 567
Stone 386
Straßmaier 54
Stratton 509
Strömberg 488, 507, 509, 529
Struve, O. 143, 153, 430, 491, 548
— W. 154, 192, 430, 538
Sueß 316
Sullivan 509

T

Tacitus 6, 43
Thalén 339
Thales 29, 30, 31, 182
Theon 33
Thiele 54
Thome 395
Tibullus 80
Timocharis 32
Tisserand 260, 630
Tissot 134
Titius 236
Todd 252
Toepfer 390
Troels-Lund 52
Truman 509
Tschou-Kung 142
Turner 450, 508, 558
Tycho Brahe 45, 149, 179, 222, 239, 307, 512, 569

U

Ulloa 190
Ulugh-Beg 142, 148, 566

V

Vassenius 343
Vitruvius 119, 137, 212
Vogel, H. C. 259, 389, 400 f., 428, 432, 508

W

van der Waals 495, 497
Walker 192
Wanach 132
Warburg 387
Warren de la Rue 333
Weiß 260
Weiße 151
Weyl 629
Whewell 209
Wiechert 629
Wilhelm IV., Landgraf von Hessen 149, 569
Wilkens 454, 509
Williams 282
Wilsing 354, 389, 412, 445, 484, 502, 503, 508 ff.
Wilson, A. 330
— H. C. 260, 445
— R. E. 487, 509
— W. E. 362
Winnecke 548
Wirtz 397, 454, 508, 509, 549
Wislicenus 176, 316
Witt 320
Wolf, Max 236, 316, 383, 384, 435, 445, 479 ff., 483 ff., 490, 505, 507 ff., 516, 548
— Rud. 175, 209, 315, 333 ff.
Wolfer 334
Wollaston 337
Wood 392
Wright 421, 431, 465, 480, 489, 490, 491, 505, 508 ff.

X

Xenophanes 1

Y

Young, C. A. 348, 349, 355, 372
— R. K. 459

Z

Zeeman 416
v. Zeipel 509
Zeiß 391
Zenneck 629
Ziehrer 577
Zöllner 313, 317, 378, 502, 507, 510
Zucchi 273, 281, 576

SACHREGISTER.

A

Aberration 143, 512, 521, 616
Abplattung 190, 193, 194
Absolute Helligkeit 381, 388, 399, 414
Absorption des Lichts in Spiralnebeln 479
— — — im Ultraviolett 416
— — — im Weltraum 469, 470, 543ff.
Achillesgruppe 238
Ägypter 10f., 60, 78
Äquator 141
— parallaktischer 551
Äquinoktialpunkte 142
Äquinoktialstunden 99
Ära 80
— des Diokletian 81
— der Juden 82
— des Nabonassar 81
— alexandrinische 81
— seleukidische 81
Aerolithe 253
Ätherstoßtheorie 613
Akronychischer Auf- und Untergang 65
Aktinometer 359
Aktinometrie, Göttinger 396, 398
— Yerkes 396
Akzeleration der Fixsterne 115
Albedo 266, 279
Algol = β Persei
Algolsterne 454ff.
Alkor = g Ursae majoris
Almagest 147, 178, 210
Alter Stil 87
American Ephemeris 90, 176
Andromedanebel 479, 481
Andalgolsterne 473
Antiapex 546
Antivertex 546
Apex der Sonnenbewegung 546ff.
Aphel 113
Apisperiode 82
R Aquarii 451
η Aquilae 411, 421, 427, 454
Araber 41f.
Archonium 505
η Argus 437
Ariel 306
Armillarsphäre 38
Aspekte 47
Asteroiden = kleine Planeten
Asträa 236
Astrolabium 38, 119, 156, 569
Astrologie 41ff.
Astronomia nova 226
AstronomischeGesellschaft 154, 155
Astronomisches Jahrbuch 90, 160, 176
— Recheninstitut 90
Aufstellung der Fernrohre 580ff.
— äquatoriale 580
— azimutale 580
— deutsche 581
— englische 581
— Fraunhofersche 581
— parallaktische 580
Auf- und Untergang 11
— — — akronychischer 65
— — — heliakischer 55
— — — kosmischer 65
Auge-Ohr-Methode 126
β Aurigae 421, 456

B

Babylonier 25f., 77
Back-Staff 158
Bahnbestimmung 243f.
Bahnelemente 243f.
Balancier 120
Bedeckungsveränderliche 454f.
Beobachtungsstuhl 583
Besteckrechnung 165
Bieliden 257
Blinkmikroskop 385, 507
Bolide 252
Bolograph 360
Bolometer 387
γ Bootis 401, 459
Boss 46, 459
Brandenburgisches Zepter 146
Breite 145
— geographische 143
Breitendienst 170
Breitengradmessungen 191
Bureau des Longitudes 90

C

RU Camelopardalis 453, 454
ξ Cancri 420, 430
α Canis majoris 406, 410, 420, 422, 602
α — minoris 401, 406, 410, 420, 422, 602
α Canum venaticorum 459
ι Cassiopejae 431
ρ — 411, 449
c-Charakter 404
β Cephei 401, 453, 459
δ — 421, 427, 452f.
μ — 448
δ Cephei-Sterne 426, 452, 453, 459, 466, 498
Ceres 236
o Ceti 401, 449ff.
Chinesen 60, 77
Christi Geburtsjahr 84
Christliche Jahreszählung 84
Chromosphäre 345, 349
Chronodeik 129
Chronograph 126
Chronometer 122, 161, 165
Chronometerprüfungen 128
Completorium 99
Connaissance des temps 90, 160, 176
R Coronae australis 492
R Coronae borealis 446
Crabnebel 483
P Cygni 436
SU — 454
X — 454
61 — 410, 522

D

Davis-Quadrant 158
Deferent 217
Deimos 298
Deklination 145
Dekret von Kanopus 78
Dichotomie 33, 204
Dione 301
Dipleidoskop 129
Direkte Bewegung 244
Dispersionsformel 394
Dodekaoros 26
Doppelrefraktor 581
Doppelsterne 154, 416f., 599
— spektroskopische 418, 421
— visuelle 418, 420
— Exzentrizitäten 425
Doppelstunde 78, 97
Dopplersche Linienverschiebung 269, 353, 416f.
Dreieck, astronomisches 145
Dreikörperproblem 234
Dreischwarmhypothese 554
Druckeffekt 416
Dumbbellnebel 483, 491
Durchgangsbeobachtungen 588
Durchgangsinstrument 125, 584
— photographisches 127
Durchmusterung, Bonner 152, 395, 538

Durchmusterung, Cordobaer 152, 395, 538
— Ogyallaer 396
— Potsdamer 396
— südliche 152

E

Ebbe und Flut 108, 599
Echappement 121
Edelgase 341
Effektive Temperatur 360, 390, 412
— Wellenlänge 388, 397
Eigenbewegung 534f.
Einheitszeit 131
Ekliptik 109, 141
Elektronentheorie 615
Ellipsoid 190, 193
Elongation 263
Enceladus 301
Enckescher Komet 603, 608
Epagomenen 78, 88
Epakten 86
Ephemeriden 160
Epizykel 178, 208, 217
Erde, Drehung 35, 105ff., 218
— Gestalt 29, 31, 181f., 184, 599
— Größe 186f., 193
— Masse 231
Erdmagnetismus 335
Erdmessung, internationale 170f., 192
Erlaßjahr 82
Eros 237, 279
Europium 459
Exentrizität 245

F

Fadenmikrometer 523
Farbenfehler der Objektive 574
Farbenindex 381, 388, 396f.
Farbenskalen 387
Farbentönung = Farbenindex
Farnesischer Atlas 566
Fatum 48
Fernrohr 261, 573ff.
— astronomisches 574
— holländisches 574
— Keplersches 574
— photographisches 589
— raumdurchdringende Kraft 537
Figur der Himmelskörper 233
Finsternisse 4
Fixsterne 373ff.
— Dichte 408f., 422f.
— Eigenbewegung 514, 545ff.
— Entfernung 511ff.
— Entwicklung 497, 556
— Größe 32
— innerer Aufbau 493
— Kugelgestalt 32
— Masse 418, 423, 424
— Verteilung 535ff.
Flashspektrum 348
Flocken 357
Fleckenrelativzahlen 333
Flutreibung 108, 608, 609
Friedrichsehre 146
Frühlingspunkt 109, 145
— mittlerer 111
Fundamenta Astronomiae 151, 517
Fundamentalsterne 517, 519

G

Gang 123
Gangregister = Gangtabelle 123, 129
Gasnebel 463, 464, 483, 504, 560
Gegenschein 258
α Geminorum 401, 422, 432, 460
ξ — 411, 421, 427, 452
η — 411, 448, 449, 452
U — 447
Geographische Ortsbestimmung 155, 298
Georgsharfe 146, 191
Geschiche der Astronomie 209
— des Fixsternhimmels 151, 155
Geschichtete Emission 490, 505
Giganten = Riesensterne
Glasspiegel 578
Gleichung, persönliche 127
Gnomon 38, 117, 141
Goldene Zahl 86
Gradmessungen 188f.
Gradstock 157
Granulation 327
Gravitation 180, 230, 598ff.
— Fortpflanzungsgeschwindigkeit 614
Gravitationseffekt 416
Grenzvermessungen 168
Griechen 29f., 60, 76
Größenklassen 377

H

Halbgitter 383
Hamuštu 79
Hanperiode 82
Harmonices mundi 226
Hauptträgheitsachsen 106
Heimarmene 48, 50
Hektor 237
Heliakischer Auf- und Untergang 65
Heliograph 334
Heliometer 522
Heliostat 593
Helium 340
Heliumsterne 401, 402
Helligkeitsschätzung 376
Helligkeitsverzeichnisse 395
Hemmung 121
Herbstpunkt 109
μ Herculis 421, 458
Himmelsbild 1ff.
Himmelsgewölbe 2
— Gestalt 215
Himmelsgloben 566
Himmelskugel 31
Höhenmessung 126
Höhenparallaxe 203
Höhlennebel 486
Horen 98
Horizont 139
Horizontalparallaxe 203
Horoskop 45, 129
Hven 222
Hyaden 477
ε Hydrae 421, 422, 430
R — 450
Hyperion 301

I

Inder 76
Indiktionen 84
Instrumente, alte 566f.
Intramerkurieller Planet 251, 605

J

Jahr, anomalistisches 28
— siderisches 28
— tropisches 66, 69, 115
Jahresanfang 83
Jahresform der Ägypter 78
— — Babylonier 77
— — Chinesen 77
— — Franz. Republik 88
— — Griechen 76
— — Inder 76
— — Juden 74
— — Mohammedaner 87
— — Römer 75
Jahreszählung 80f.
Jakobsstab 157
Japetus 301
Johannisfeuer 7
Juden 60, 74
Juno 236
Jupiter 280
— Monde 298

K

Kalender 90
Kalenderformen s. Jahresform
Kalenderreform, julianische 75
— gregorianische 86
Kalenderuhr 38
Kaliyuga 82
Kanopus, Dekret von 78
Karlseiche 146
Kasbu 78
Katasterismen 22
Kalziumlinie, unbewegte 439, 457
Kenongrechnung 71
Keplersche Gesetze 179, 225f.
Klepshydra = Wasseruhr
Knoten 109, 216, 244
Komet, Bielascher 240, 242, 256
— Enckescher 603, 608
— Halleyscher 239, 243, 307, 312
Kometen, Bahn 239
— Gestalt 306ff.

Kometen, Spektrum 311
— Schweife 312
Kometenfamilien 241
Kometenfurcht 46
Kometensysteme 242
Konjunktion 264
Kontraktionstheorie 493
Koordinatensysteme 144
Korona 344, 354, 368
Koronium 355
Korrespondierende Höhen 126
KosmischerAuf- und Untergang 65
Kosmos 39
Kreisel 109
Kreisteilmaschine 570
Kreisteilung 569
Kreisuntersuchung 572
Krikos 38
Krippe 153
Krümmung des Raumes 625
Kugelgestalt des Himmels 30
Kulmination 97
Kuppelbauten 583
Kynosura = α Ursae minoris

L

12 Lacertae 42, 427, 459
Länge 145
— geographische 143
Längenbestimmung 94, 122, 298
Längengradmessungen 192
Landbaujahr 64
Landeszeit 131
Leoniden 257
Libelle 585
Libellenquadrant 173
Libration 288
Librationspunkt 238
Lichtgeschwindigkeit 298, 321
Lichtsignale 192
Lichtzeit 321, 527
Lineal, parallaktisches 206
Lorentztransformation 622
Lotabweichung 192
Lunisolarjahr 69
β Lyrae 421, 457
RR — 421, 427, 452
Lyriden 257

M

Magellansche Wolken 468, 472, 473, 476, 487
Mangso 64
Mars 271
— Kanäle 275
— Monde 297
— Störung der Perihellänge 601
Matutina 99
Mauerquadrant 38
Mechanik des Himmels 230, 233
Meridian 111, 117
Meridiankreis 584
Meridiansaal 587
Merkur 264
Merkur, Perihelbewegung 251, 601, 605
Merkurdurchgang 263
Mesosiderite 253
Meßring 569
Meteore 108, 252 f.
Meter 190, 197
— internationales 193, 199
— legales 193, 198
— des archives 198
Metons Zyklus 70
Mette 99
Mikrometer, unpersönliches 127
Mikrophotometer 384, 390
Milchstraße 19, 37, 470, 530
Mimas 301
Minute 97
Mira = o Ceti
Miratypus 449
Mittagslinie 117
Mitteleuropäische Gradmessung 192
Mizar = ξ Ursae majoris
Monat, anomalistischer 28
— hohler 68
— siderischer 71, 288
— synodischer 28, 68, 72, 288
— voller 68
Monatsnamen 80, 83
Mond 288 f.
— Durchmesser 208
— Entfernung 34, 208
— Erhellung durch die Sonne 33
— im Horizont vergrößert 206
— Krater 292
— Name 8, 61
— Parallaxe 203, 205 ff.
— Rillen 295
— säkulare Beschleunigung 604, 608
— Strahlensysteme 294
— Wallebenen 293
Mondatmosphäre 291
Monddistanzen 164
Mondfinsternisse 4, 183, 192, 205
Mondhäuser 62, 71
Mondjahr 61, 64, 68 f.
— gebundenes 69
— reines 69, 87
Mondkulminationen 164
Mondkult 6, 61
Mondphasen 72
Mondstationen 25, 27
Mondtafeln 161, 162, 235
Montierung = Aufstellung
Muhûrta 78
Mysterium cosmographicum 223, 235

N

Nachbarsterne der Sonne 527
Nadir 144
Nakshatra 62, 71, 77, 80
Nâse 87
Naturjahr 59, 63 ff., 71
Nautical Almanac 90, 160, 176
Nebel 463 ff., 477 ff.
Nebelregionen 486
Nebelspektrum 484
Nebelsterne 486 ff.
Nebulium 505
Neigung 244
Neptun 287
— Entdeckung 248 f., 601
— Mond 306
Neuer Stil 87
Neue Sterne 435 f., 502
Neumond 1, 67
Newtonsches Gesetz 230, 598 ff.
Nickelstahlpendel 123
Nikäa, Konzil 87
Nordamerikanebel 484
Noon 99
Normalkalender 90
Normalmeter 195 f.
Normaluhren 129, 130
Nona 99
Nova S Andromedae 1885 482
— Aquilae 1918 435 f.
— Aurigae 1891 436 f.
— Cassiopeiae 1572 437
— Z Centauri 1895 482
— Geminorum 1911 441 f.
— Persei 1901 436 f.
Novanebel 445
Nundina 79
Nutation 110, 143

O

Oberon 306
Objektivgitter 383
Objektivprisma 361
Objektivuntersuchung 579
Öluhr 119
Oktaëdris 70, 73
Okularspektroskop 391
Olympiaden 81
70 Ophiuchi 420, 422, 430
Opposition 272, 320
Orientation 12, 66
Orionnebel 483, 484, 532
α Orionis 401, 449
δ — 457
Ortsbestimmung 138 ff.
— auf See 155 f.
— in Flugzeugen 172
Ortszeit 102
Osterfest 85, 88
Ostergrenze 86

P

Pallas 236
Parallaktische Bewegung = säkulare Parallaxe
Parallaktisches Lineal 206
Parallaxe 143, 202
— tägliche 111, 202
— jährliche 202, 208, 521 f.
— säkulare 521

Passage = Durchgang
Passageprisma 129
Passahfest 85
κ Pegasi 420, 422, 431
Pendelfeder 122
Pendeluhren 120
Perihel 113, 244
Periheldistanz 245
β Persei 401, 406, 421, 428, 456
o — 421, 460
φ — 421, 460
Perseïden 257
Persönliche Gleichung 127, 588
Pfluggestirn 64
Phobos 298
Phoebe 301
Phönixperiode 82
Photochronograph 128
Photoelektrische Zelle 385
Photographie 277, 290, 296, 325, 589
Photographische Himmelskarte 153, 539
— Photometrie 380f.
Photometer 378f.
Photometrie 376
Photosphäre 326
19 Piscium 406
Planetarische Nebel 486ff.
Planetarium 38
Planeten 146, 216, 221ff.
— äußere 278
— innere 278
— untere 263
— obere 271
— kleine 236, 278
— Massenbestimmung 230
Planetenhäuser 47
Planetentafeln 235
Planisphärium 119
Plejaden 66, 476, 477, 534
Plejadennebel 483, 485
Pol 139
Polarstern = α Ursae minoris
Polaruhr 117
Poldistanz 145
Polhöhe 145
Polhöhenschwankung 107, 169f.
Potsdamer Refraktor 581
Präsepe 163
Präzession 28, 32, 55, 109, 121, 142, 232, 548, 599
Prima 99
Principia mathematica Newtons 232
Prismenkamera 391
Prokyon = α Canis minoris
Protofluor 505
Protuberanzen 345f., 350, 368
Prutenische Tafeln 221
Pulsationstheorie 500
ξ Puppis 401, 406
Pyrheliometer 359

Q

Quadrant 157, 158, 569
Quarzspektrograph 444
Quecksilberhorizont 586
Quecksilberpendel 123

R

Radialbewegung 516, 549
Radianten 254
Radiomikrometer 386
Radkarten 185
Räderuhren 104, 120
Refraktion 222, 517
Registrierverfahren 127
Rektaszension 112, 145, 518
Relativitätstheorie 616f.
Retrogad 216, 244
Rhea 301
Riesenterne 408f., 414, 415, 495, 556.
Ringnebel 486ff., 491
Römer 60, 75
Römerzinszahl 84
Rostpendel 123
Rotation 105f
Rotierende Kamera 384
Rudolphinische Tafeln 149, 221, 226

S

Sabbatjahr 82
R Sagittae 452
Sakaära 81
Sanduhr 119, 568
Saros 28, 342
Saturn 284
— Monde 300
— Ring 302
Schaltung 67ff.
Schiefe der Ekliptik 109, 141ff., 518
Schlaguhren 100
Schraffiermethode 384
Schraubenuntersuchung 571
Schwärzungsgesetz 383
Schwerpunkt 105
R Scuti 448f.
Sedperiode 82
Sekunde 97, 105
Selenographie 289
Selenzelle 385
W Serpentis 454
Sexta 99
Siderite 253
Siesta 99
Sirius = α Canis majoris
Siriusweite 536
Skaphe 38, 118, 568
Skaphion 186, 212
Snow-Teleskop 593
Solarkonstante 359
Sonne 318ff., 409, 410
— Entfernung 33, 319
— Helligkeit 395
— Parallaxe 319ff.
Sonne, Strahlung 359
— Temperatur 359, 360, 497
Sonnenfackeln 327
Sonnenfinsternis 341
Sonnenflecken 327
— Periode 332
Sonnenjahr 64, 70
Sonnenkult 6, 9, 10
Sonnenlehen 12
Sonnenmythen 23
Sonnenring 119
Sonnentheorie von Julius 370
— — Kirchhoff 341, 348, 364
— — Schmidt 366
— — Zöllner 365
Sonnenuhr 98, 117, 118, 567
Sonnenzeit, mittlere 102, 112, 119
— wahre 102, 113
Sonnenzirkel 89
Sonntagsbuchstaben 86
Sothis = Sirius
Sothisperiode 82
Spektralanalyse 338
Spektrallinien, Intensität 414
Spektraltypen oder -klassen 400ff.
Spektroheliograph 352, 355
Spektrokomparator 394
pezialbewegungen 550ff.
Sphären 216
Spärenharmonie 19, 201
Sphärische Abweichung der Objektive 574
Sphäroid 189
Spica = α Virginis
Spiegelsextant 159, 161
Spiegelteleskop 576ff., 591
— Sternbild 146
Spiralnebel 463, 477, 561
— innere Bewegungen 481
— Parallaxe 482
— M 51 479
— M 81 481
— M 101 481
Stadium 194
Starkeffekt 416
Steigrad 120
Steinmeteorite 253
Stereokomparator 384, 507, 516, 548
Sternbedeckungen 162ff., 192
Sterne erster Größe, Parallaxen 526
— Bezeichnung 147
Sternbilder 20, 26, 140, 146
Sterneichungen 535
Sternfarben 154, 387f., 396f.
Sternhaufen 463ff., 560
— bewegte 477
— kugelförmige 465ff., 560
— offene 475ff.
— ω Centauri 468, 471, 473
— M 3 468, 471ff.
— M 5 468, 473, 475
— M 11 477

Sternhaufen M 13 468, 470 ff.
— M 67 476
— NGC 1647 476
—veränderliche 473
Sternhöhlen = Sternleeren 486
Sternkarten, akademische 151
— photographische 153
Sternkataloge 147 f., 516
Sternkult 15
Sternscharen 550
Sternschnuppen 252 f.
— und Kometen 256
Sternspektra 400 f.
— Energieverteilung 389
— Klassen 400 ff.
Sternspektrograph 393
Sternspektroskop 391
Sternsystem 557 ff.
Sterntag 110
Sternuhr 116
Sternwarten 121, 595
Sternweite 527
Sternzeit 112
Störungen 234, 240, 241
Stoicheion 58, 96, 117
Stonehenge 14
Strahlung der Fixsterne 493 f.
Strahlungsdruck 312, 368, 369, 494
Strahlungsgleichgewicht 494
Stufenschätzung 378
Stundenkreis 112, 145
Stundentafeln 117
Stundenwinkel 112, 145
Sumnerlinien 166
Synodischer Umlauf 237, 265

T

Tag 94 ff., 100, 105
— Beginn 79, 95
— Einteilung 96
— Unveränderlichkeit 107, 609
Taschenuhren 120
λ Tauri 429
Tekupharechnung 74
Telespektroskop 346, 393
Temporalstunden 78, 97, 98
Tertia 99
Terzie 97
Themis 301
Theoria motus von Gauß 247
Thermoelement 386
Thermostat 393
Thetis 301
Tierkreis 21
Titan 301
Titania 306
Titiussche Regel 236, 251
Toise 196
Trabanten-Monde 296 f.
Trägheitsmoment 106
Transneptunischer Planet 252
Triquetrum 206
Trojaner = Achillesgruppe
Turmteleskop 593

U

Uhr, große 102
— halbe 102
— italienische 100
— kleine 102
— Nürnberger 101
— türkische 102
Uhren 120
— elektrische 122, 130
Uhrkorrektion 123
Umbriel 306
Umkehrende Schicht 348
Unendlichkeit der Welt 36, 607
Unpersönliches Mikrometer 588
Unruhe 121
Unveränderliche Ebene 235
Uranometria 147
— Argentina 395
— Oxoniensis 396
Uranus 248, 285
— Monde 305
ε Ursae majoris 421, 458
ζ — — 421, 432, 459
ξ — — 420, 422, 431
g — — 432, 460
— —-Gruppe 464
α — minoris 141, 401, 406, 411, 421, 427, 428

V

Variation 222
Velox Pictoris 516
Venus 267
— Störung der Knotenlänge 601
Venusdurchgang 263, 271, 320
Veränderliche Nebel 491
— Sterne 434 f.
— — Einteilung 435
— — Statistik 461
Vertex 546
Vertikalkreis 144
Vesper 95, 99
Vesta 236
Vigilien 95
α Virginis 66, 421
Vorzeit 1
Vulkan = intramerkurieller Planet

W

Wandeljahr 70
Wandelsterne = Planeten
Wasserstoff, zweite Nebenserie 406
Wasseruhr 100, 104, 119, 568
Weihnachtsfest 7
Wellenlänge des Lichts 199, 200
Weltären 84
Weltbild, jetziges 562
Weltsystem, geozentrisches 34, 216
— heliozentrisches 35, 36
— des Pythagoras 216
— des Ptolemäus 217
— des Kopernikus 217
— des Tycho 35, 223
Weltzeit 132
Wetter 16, 334, 335
Widerstehendes Mittel 242, 608
Woche 79
Wolf-Rayet-Sterne 401, 489 f.

Z

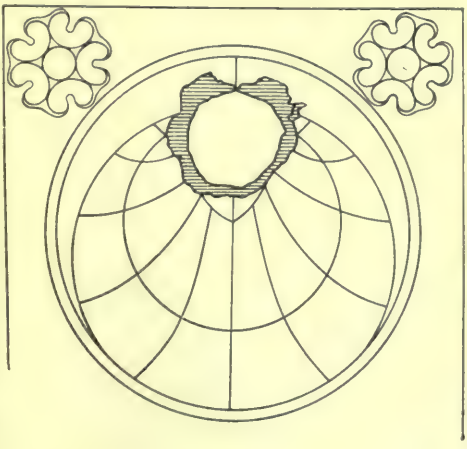
Zeemaneffekt 357, 416
Zentralbewegung 227
Zentralkörper 534
Zeiger (ganzer, halber..) = Uhr
Zeit 102, 112
— mitteleuropäische 130
— mittlere 102
— wahre 102
Zeitball 130, 167
Zeitbestimmung 114
— astronomische 124
— Genauigkeit 92, 124, 126, 128
— ohne Instrumente 116
Zeitgleichung 114
Zeitmessung 92 ff.
Zeitsignale 130, 132, 167
Zeitsinn 57, 99, 104, 125
Zenit 144
Zirrusnebel 484
Zodiakallicht 258, 606
Zölostat 593
Zonenbeobachtungen 538
Zonenkatalog 155
Zonenzeit 130 f.
Zweischwarmhypothese 552, 558
Zwergsterne 408 f., 414 f., 557

Von Einzelobjekten des Fixsternhimmels wurden nur diejenigen in obiges Register aufgenommen, über die der Text ausführlichere Angaben enthält, nicht solche, die nur in den Tabellen auf den Seiten 401, 406, 410, 411, 420, 421, 422, 427, 468, 472, 480 und 488 vorkommen oder die nur als Beispiel für bestimmte Erscheinungen genannt sind.

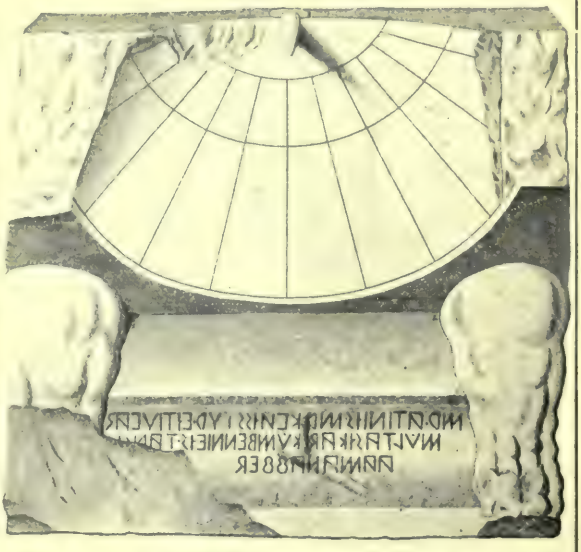
Druck von B. G. Teubner in Leipzig.

Berliner Skaphe.
(Beschr. d. Berl. Skulpt. Nr. 1049.)

Konische Sonnenuhr.
(Berliner Skulpturen Nr. 1048.)



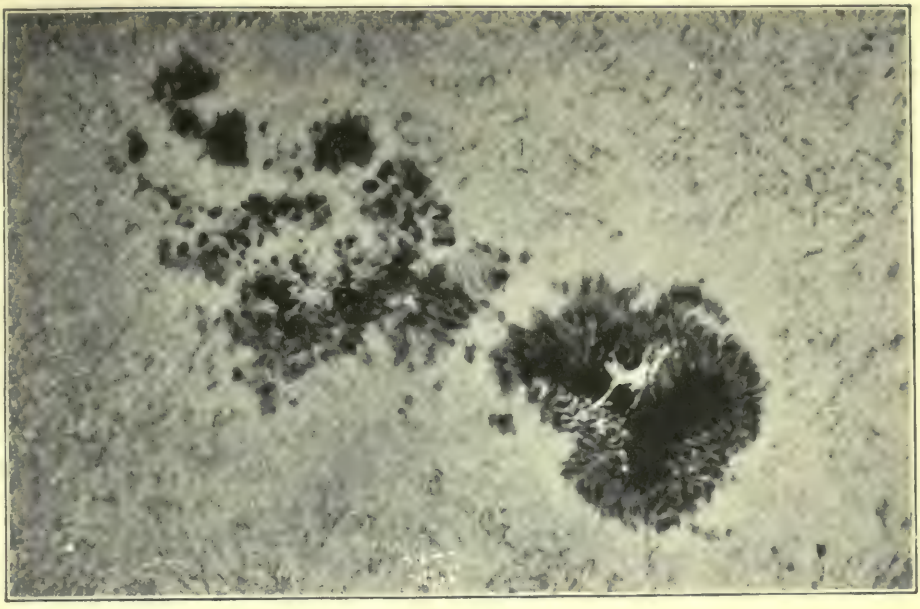
Netz obiger Skaphe.



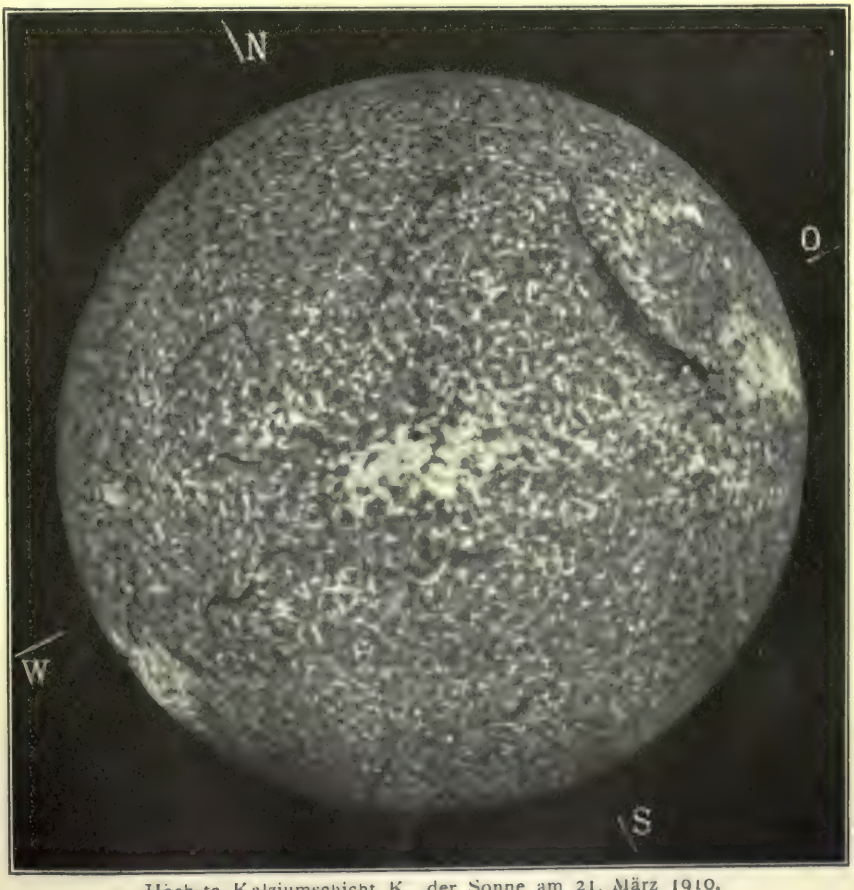
Konische Sonnenuhr aus Pompeji.

Antike Sonnenuhren.

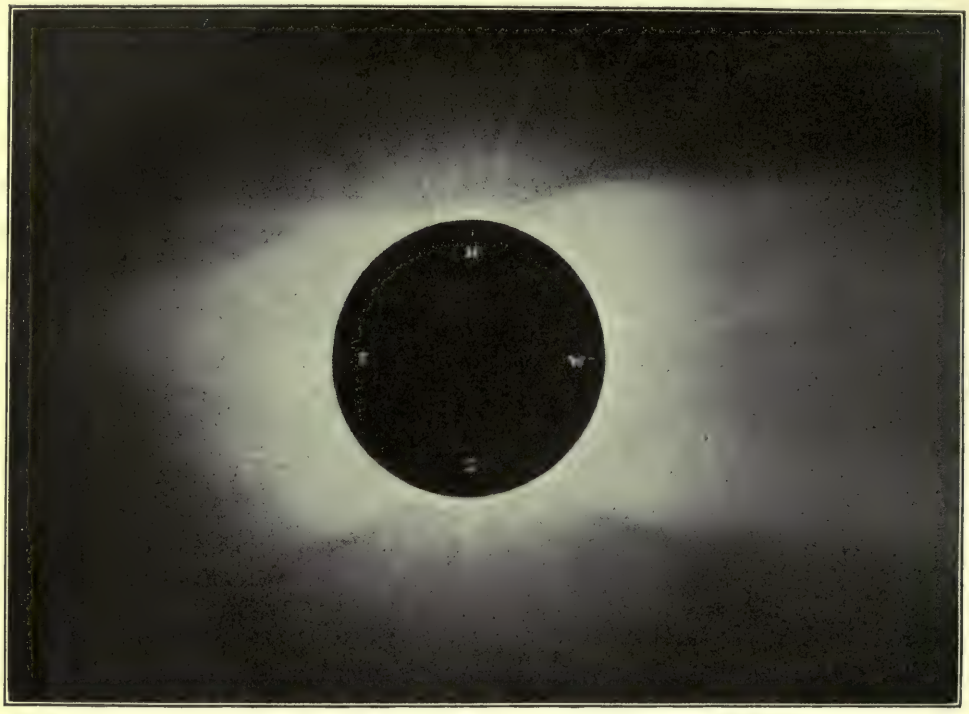
Photographisch-optischer Doppelrefraktor
des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam.



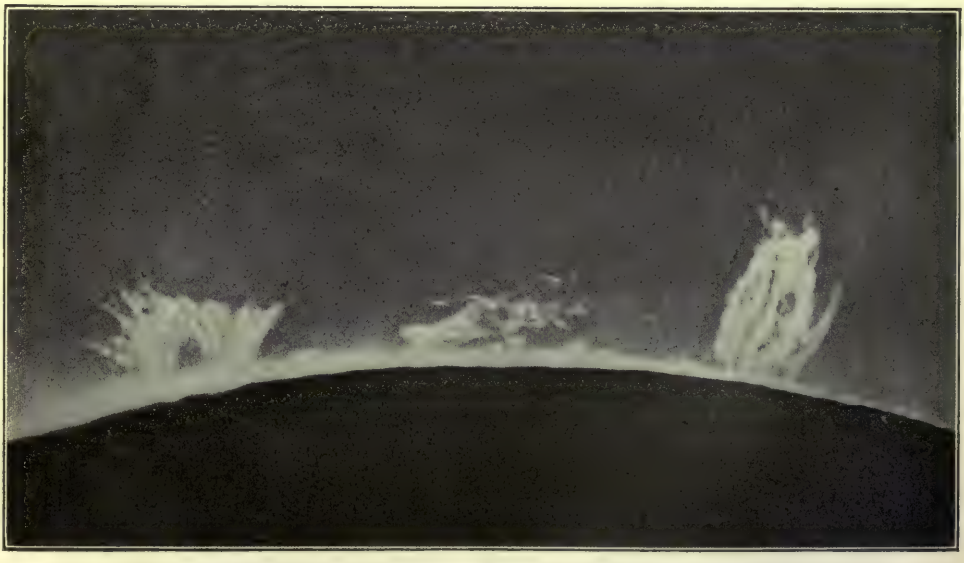
Gruppe von Sonnenflecken. Direkte Aufnahme von J. Janssen in Meudon.



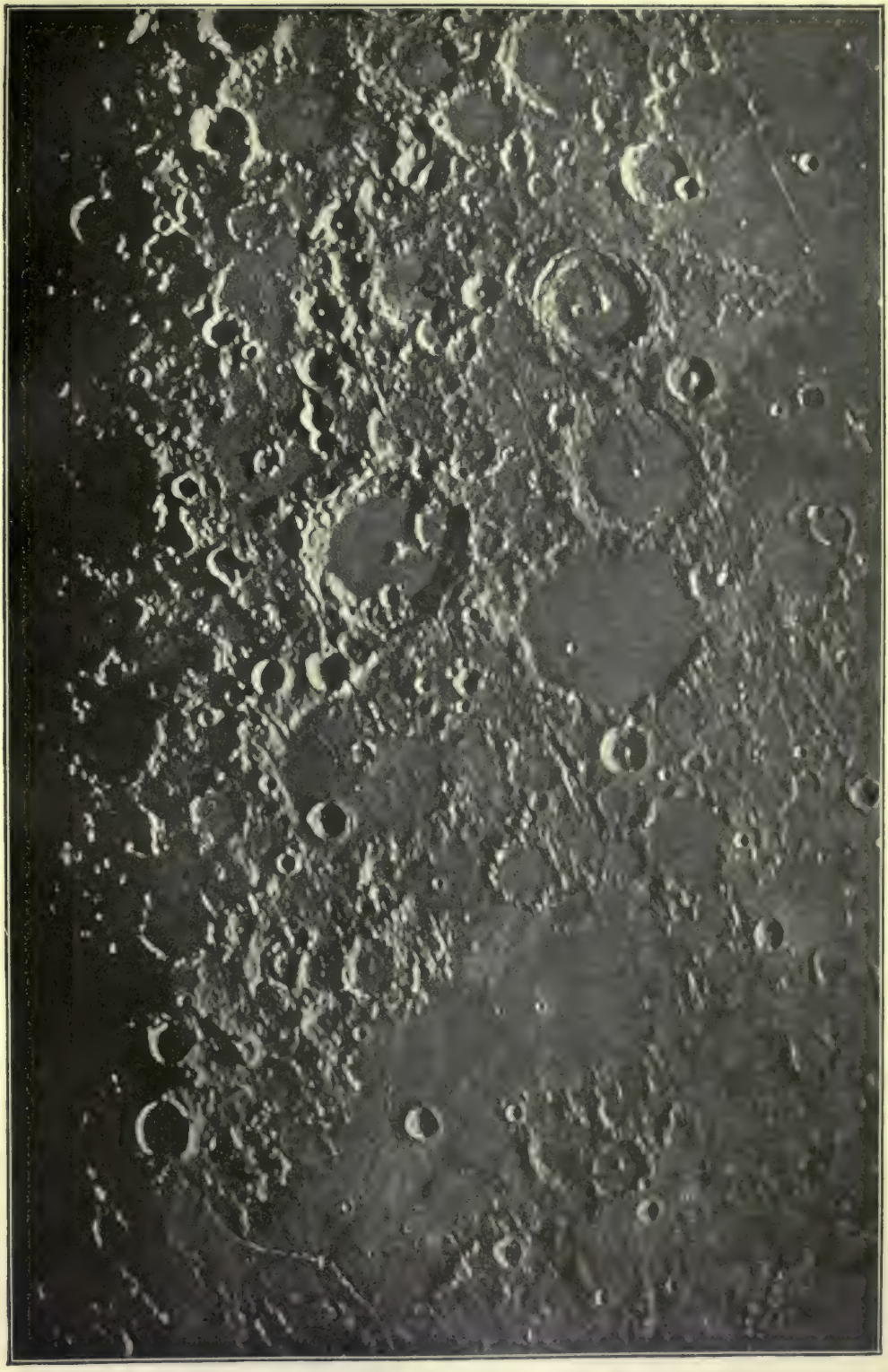
Höchste Kalziumschicht K_3 der Sonne am 21. März 1910.
Spektroheliographische Aufnahme von H. Deslandres in Meudon.



Korona bei der totalen Sonnenfinsternis am 28. Mai 1900.
Aufnahme von Rev. Father Searle bei der Smithsonian-Expedition in Wadesboro, N. Carolina.



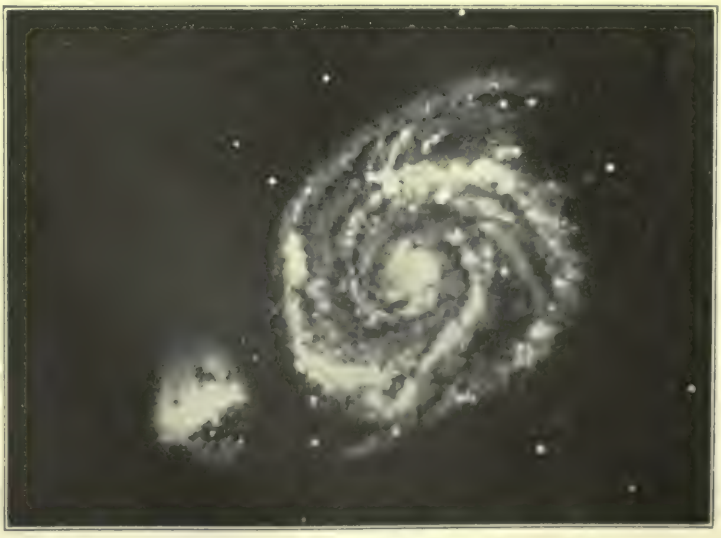
Protuberanzen im Südwest-Quadranten des obigen Bildes.
Aufnahme von E. E. Barnard und G. W. Ritchey bei der Yerkes Expedition in Wadesboro, N. Carolina.



Mitte der Mondscheibe im letzten Viertel, am 29. August 1907.
Aufnahme von Puiseux und Le Morvan in Paris.

Komet 1908 c (Morehouse) am 16. November 1908.
Aufnahme von M. Wolf in Heidelberg.

Der kugelförmige Sternhaufen M 5 in der Wage.
Aufnahme von J. E. Keeler mit dem Crossley-Reflektor der Lick-Sternwarte.



Spiralnebel M 51 in den Jagdhunden.
Aufnahme von M. Wolf in Heidelberg.

Andromedanebel M 31.

Aufnahme von G. W. Ritchey, Yerkes-Sternwarte.

Werke über Astronomie

Astronomisches Wörterbuch. Von Observator Dr. *H. Naumann.* (Teubners kleine Fachwörterbücher.) (In Vorb. 1920.)

Wird bei der Vielseitigkeit seines Inhaltes allen, die sich für Astronomie interessieren, die besten Dienste leisten.

Dialog über die beiden hauptsächlichsten Weltsysteme, das ptolemäische u. das kopernikanische. Von *Galileo Galilei.* Aus dem Italienischen übersetzt und erläutert von *E. Strauß.* Geh. M. 38.—, geb. M. 44.—

Die Mechanik des Weltalls. Eine volkstüml. Darstellung der Lebensarbeit *Johannes Keplers*, besond. sein. Gesetze u. Probleme. Von Dir. Dr. *L. Günther.* Mit 13 Fig., 1 Tafel und vielen Tabellen. Geb. M. 2.50

„Ein von einem gründlichen Kenner der Geschichte der Astronomie und der Lebensarbeit Keplers insbesondere verfaßtes, überaus reichhaltiges und viele kaum bekannte Dinge ans Licht ziehendes Büchlein."
(Pädagogisches Archiv.)

Keplers Traum oder nachgelassenes Werk über die Astronomie d. Mondes. Übersetzt u. kommentiert v. Dir. Dr. *L. Günther.* Mit ein. Bildnis Keplers, dem Faksimile-Titel der Orig.-Ausg., 24 Abb. i. Text u. 2 Taf. Geh. M. 8.—

Mathematische Streifzüge durch die Geschichte der Astronomie. Von Stud.-Rat Dr. *P. Kirchberger.* Kart. M. 2.—

Gibt einen kurzen Abriß der Sternkarte von den ältesten Zeiten bis zur unmittelbaren Gegenwart, indem es einzelne astronomische Probleme einer elementaren mathematischen Behandlung zugänglich macht, davon die Auswahl teils nach historisch-astronomischen Gesichtspunkten, teils nach mathematischen erfolgt ist.

Über die astronomischen Arbeiten v. Gauss. (Materialien f. eine wissensch. Biograph. v. Gauss. Gesamm. v. Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. *F. Klein*, Prof. Dr. *M. Brendel* und Prof. Dr. *L. Schlesinger.* Heft 7.) I. Abhandl. Theoretische Astronomie. Geh. M. 6.—

Astronomie. Redigiert von Geh. Rat Prof. Dr. *K. Schwarzschild* (Enzyklopädie d. math. Wissensch. mit Einschluß ihr. Anwend. 6. Bd. 2. Teil).

Heft 1 1905	geh. M. 5.80	Heft 4 1912	geh. M. 3.—
Heft 2 1908	„ „ 4.—	Heft 5 1912	„ „ 3.40
Heft 3 1910	„ „ 3.60	Heft 6 1915	„ „ 4.40
		Heft 7 1920	geh. M. 4.—

Theorie der Planetenbewegung. Von Dr. *P. Meth.* Mit 17 Fig. u. 1 Taf. Kart. M. 2.—

Vorlesungen über die Physik d. Sonne. Von Prof. Dr. *E. Pringsheim.* Mit 253 Fig. und 7 Figurentafeln. Geh. M. 16.—, geb. M. 18.—

„Wer sich zu klarem Verständnis für die Sonnenphysik durcharbeiten will, wird hier einen Führer finden, der sorgsam erwägend auf die Pfade zu den wichtigsten Quellen weist." (Pädagogisches Archiv.)

Ebbe und Flut sowie verwandte Erscheinungen im Sonnensystem. Von *G. H. Darwin.* Deutsch von *A. Pockels.* 2. Aufl., 52 Illustrationen. Geb. M. 8.—

Lehrbuch der kosmischen Physik. Von Prof. Dr. *W. Trabert.* Mit 149 Figuren u. 1 Tafel. Geh. M. 20.—, geb. M. 22.—

Gaskugeln. Anwendungen der mechanisch. Wärmetheorie auf kosmologische u. meteorologische Probleme. Von Prof. Dr. *R. Emden.* Mit 24 Fig., 12 Diagr. u. 5 Taf. im Text. Geb. M. 13.—

Dynamische Meteorologie. Von Prof. Dr. *F. M. Exner.* Mit 68 Fig. im Text. Geh. M. 16.—, geb. M. 18.—

„Das Buch wird jedem studierenden und lehrenden Physiker, der sich über die wichtigsten Fragen der jungen Wissenschaft einen genaueren Überblick verschaffen will, Freude machen."
(Naturwissenschaftliche Wochenschrift.)

Über das System der Fixsterne. V. Prof. Dr. *K. Schwarzschild.* 2. Aufl. M. 13 Fig. M. 1.20

Mathematische Theorie der astronomischen Finsternisse. Von Prof. Dr. *P. Schwahn.* M. 20 Fig. Kart. M. 3.20, geb. M. 3.60

Beobachtung des Himmels mit einfachen Instrumenten. Von Studienr. *Fr. Rusch.* 2. Aufl. Kart. M. 2.—

Himmelsbeobacht. mit bloßem Auge. Von Studienr. *Fr. Rusch.* 2. Aufl. Mit zahlr. Fig. [U. d. Pr.]

Populäre Astrophysik. Von Prof. Dr. *J. Scheiner.* Mit Taf. u. zahlr. Fig. 3. Aufl. von Prof. Dr. *K. Graff.* [U. d. Pr.]

„... Die neuesten Forschungsergebnisse sind berücksichtigt, die Darstellung ist überall einfach, klar und kritisch gewissenhaft..."
(Monatshefte für Mathematik und Physik.)

Große Physiker. Von Realg.-Dir. Dr. *J. Keferstein.* Bilder a. d. Geschichte d. Astronomie u. Physik. Mit 12 Bildn. Geb. M. 6.60

Praktische Astronomie. (Geogr. Orts- u. Zeitmessung.) Von Adj. *V. Theimer.* [U. d. Pr.]

Aerodynamik. Ein Gesamtwerk über das Fliegen von *F. W. Lanchester.* Aus dem Engl. übersetzt v. Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. *C.* u. Geh. Med.-Rat Prof. Dr. *A. Runge.* 2 Bde. Geb.

Bd. I: Mit Anhängen über die Geschwindigkeit u. den Impuls von Schallwellen, über die Theorie des Segelfluges usw. Mit 162 Fig. u. 1 Taf. Bd. II. Aerodynamik. Mit Anhängen über die Theorie u. Anwendung des Gyroskops, über Flug des Geschosses usw. Mit 208 Fig. u. 1 Titelbild. Geb. je M. 12.—

Astronomische Erdkunde. Von Prof. *O. Hartmann.* 5., neu bearb. Aufl. Mit 38 Textfig., 1 Stern- u. 1 Mondbahnk. u. 98 Übungsaufg. Kart. M. 1.40

Didaktik der Himmelskunde und der astronomischen Geographie. Mit Beitr. v. *W. Foerster, K. Haas, M. Koppe, S. Oppenheim, A. Schülke.* Verfaßt von Dr. *A. Höfler.* Mit 2 Taf. u. 80 Fig. Geh. M. 11.—, geb. M. 12.—

Auf sämtliche Preise Teuerungszuschlag des Verlags (ab April 1920 100%, Abänd. vorbehalt.) u. teilw. d. Buchhandl.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Aus Natur und Geisteswelt

Jeder Band kartoniert M. 2.80, gebunden M. 3.50

Hierzu Teuerungszuschläge: ab April 1920 100%, Abänderung vorbehalten

Der Bau d. Weltalls. V. Prof. Dr. *J. Scheiner.* 5. Aufl., bearb. von Prof. Dr. *P. Guthnick.* Mit 28 Figuren im Text. (Bd. 24.)

Das astron. Weltbild im Wandel d. Zeit. Von Prof. Dr. *S. Oppenheim.* I. Vom Altertum b. z. Neuzeit. 3. Aufl. Mit 18 Abb. II. Moderne Astronomie. 2. Aufl. M. 9 Fig. i. Text u. 1 Tafel. (Bd. 444/45.)

Sternglaube und Sterndeutung. Die Geschichte und das Wesen der Astrologie. Unter Mitwirkung von Geh.-Rat Prof. Dr. *C. Bezold* dargest. von Geh. Hofrat Dr. *Fr. Boll.* 2. Aufl. Mit 1 Sternkarte und 20 Abbildungen. (Bd. 638.)

Entstehung der Welt und der Erde nach Sage und Wissenschaft. Von Prof. Dr. *M. B. Weinstein.* 2. Aufl. (Bd. 223.)

Weltuntergang in Sage und Wissenschaft. Von Prof. Dr. *S. Oppenheim* u. Prof. Dr. *K. Ziegler.* (Bd. 720.)

Die Sonne. Von Dr. *A. Krause.* Mit 64 Abbildungen. (Bd. 357.)

Der Mond. Von Prof. Dr. *J. Franz.* 2. Aufl. Mit 34 Abb. im Text u. 2 Doppeltafeln. (Bd. 90.)

Die Planeten. Von Prof. Dr. *B. Peter.* 2. Aufl. durchgearb. von Observator Dr. *H. Naumann.* Mit 16 Figuren. (Bd. 240.)

Astronomie in ihrer Bedeutung für das praktische Leben. Von Prof. Dr. *A. Marcuse.* 2. Aufl. Mit 26 Abb. i. T. (Bd. 378)

Der Kalender in gemeinverständlicher Darstellung. Von Prof. Dr. *W. F. Wislicenus.* 2. Aufl. (Bd. 69.)

Sphärische Trigonometrie, zum Selbstunterricht. Von Geh. Stud.-Rat Prof. *P. Crantz.* Mit 27 Figuren. (Bd. 605.)

Ausgleichungsrechnung, nach der Methode der kleinsten Quadrate. Von Geh. Reg.-Rat Prof. *E. Hegemann.* Mit 11 Fig. im Text. (Bd. 609.)

Nautik. Von Direktor Dr. *J. Möller.* 2. Aufl. Mit 64 Figuren. (Bd. 255.)

Einführung in die Wetterkunde. 3. Aufl. von „Wind und Wetter". Von Prof. Dr. *L. Weber.* Mit 28 Abbild. im Text und 3 Tafeln. (Bd. 55.)

Unser Wetter. Eine Einführung in die Klimatologie Deutschlands an der Hand von Wetterkarten. Von Dr. *R. Hennig.* 2. Aufl. Mit 48 Abbildungen. (Bd. 349.)

Die Uhr. Grundlagen und Technik der Zeitmessung. Von Dr. *H. Bock.* 2. Aufl. Mit 55 Abbildungen. (Bd. 216.)

Die optischen Instrumente. (Lupe, Mikroskop, Fernrohr, photographisches Objektiv und ihnen verwandte Instrumente.) Von Prof. Dr. *M. v. Rohr.* 3. Aufl. Mit 83 Abb. (Bd. 88.)

Spektroskopie. Von Dr. *L. Grebe.* 2. Aufl. Mit 63 Fig. i. Text u. a. 2 Doppeltaf. (Bd. 284.)

Das Licht und die Farben. Einführung in die Optik. Von Prof. Dr. *L. Graetz.* 4. Aufl. Mit 100 Abb. (Bd. 17.)

Sichtbare und unsichtbare Strahlen. Von Prof. Dr. *R. Börnstein.* 3. neub. Aufl. von Prof. Dr. *E. Regener.* (Bd. 64.)

Die Röntgenstrahlen und ihre Anwendung. Von Dr. *G. Bucky.* Mit 85 Abb. im Text und auf 4 Tafeln. (Bd. 556.)

Das Radium und die Radioaktivität. Von Prof. Dr. *M. Centnerszwer.* 2. Aufl. Mit 33 Figuren im Text. (Bd. 405.)

Die Lehre von der Wärme. Gemeinverständlich dargestellt von Prof. Dr. R. *Börnstein.* 2. Aufl. hrsg. von Prof. Dr. A. *Wigand.* Mit 33 Abb. (Bd. 172.)

Die Grundbegriffe der modernen Naturlehre. Einführung in die Physik. Von Hofrat Professor Dr. *F. Auerbach.* 4. Aufl. Mit 71 Fig. (Bd. 46.)

Werdegang der modernen Physik. Von Dr. *H. Keller.* Mit 13 Fig. (Bd. 343.)

Das Wesen der Materie. Von Prof. Dr. *G. Mie.* I. Moleküle u. Atome. 4. Aufl. Mit 25 Fig. (Bd. 58.) II. Weltäther u. Materie. (Bd. 59.)

Einführung in die Relativitätstheorie. Von Dr. *W. Bloch.* 2. verb. Aufl. Mit 16 Fig. (618.)

Luft, Wasser, Licht und Wärme. Neun Vorträge aus dem Gebiete der Experimentalchemie. Von Geh. Reg.-Rat Dr. *R. Blochmann.* 4. Aufl. Mit 115 Abbildungen. (Bd. 5.)

Naturphilosophie. Von Prof. Dr. *M. Verweyen.* 2. Aufl. (Bd. 491.)

Naturwissenschaften, Mathematik u. Medizin im klassischen Altertum. Von Prof. Dr. *J. L. Heiberg.* 2. Aufl. M. 2 Fig. (Bd. 370.)

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

DIE KULTUR DER GEGENWART

IHRE ENTWICKLUNG UND IHRE ZIELE

HERAUSGEGEBEN VON PROF. PAUL HINNEBERG

DIE MATHEMATISCHEN WISSENSCHAFTEN

Unter Leitung von **F. Klein.** (Teil III, Abt. I.)

Die Beziehungen der Mathematik zur Kultur der Gegenwart. Von A. Voß. **Die Verbreitung mathematischen Wissens und mathematischer Auffassung.** Von H. E. Timerding. Geh. M. 6.— (Nr. 1 und 2.)

Die Mathematik im Altertum und im Mittelalter. Von H. G. Zeuthen. Geh. M. 3.— (Nr. 3.)

Über die mathematische Erkenntnis. Von A. Voß. Geh. M. 5.— (Nr. 6.)

„Wir haben hier eine ideale Zusammenfassung einer Wissenschaft, welche in entwicklungsgeschichtlicher Erfassung den Werdegang und den heutigen Stand so darstellt, daß daraus tatsächlich der volle Einblick in die Ziele des Faches gewonnen wird." (Allg. Literaturblatt.)

PHYSIK

Unter Redaktion von **E. Warburg,** Charlottenburg. (Teil III, Abt. III, Band 1:

Mit 106 Abbildungen. 2. Aufl. in Vorbereitung. [Erscheinungstermin unbestimmt.]

Inhaltsübersicht: **1. Mechanik:** E. Wiechert. — **2. Akustik:** F. Auerbach. — **3. Wärme:** E. Warburg. L. Holborn. F. Henning. W. Jäger. H. Rubens. W. Wien. E. Dorn. A. Einstein. — **4. Elektrizitätslehre:** F. Richarz. E. Lecher. H. A. Lorentz. R. Gans. E. Gumlich. F. Braun. M. Wien. H. Starke. W. Kaufmann. E. Gehrcke. O. Reichenheim. J. Elster. H. Geitel. St. Meyer. E. v. Schweidler. — **5. Lehre vom Licht:** O. Wiener. O. Lummer. F. Exner. E. Gehrcke. P. Zeeman. — **6. Allgemeine Gesetze und Gesichtspunkte:** E. Warburg. F. Hasenöhrl. M. Planck. A. Einstein. W. Voigt.

„Es ist nun gelungen ein das weite Gebiet der Physik umfassendes Werk zu schaffen, das sowohl für die Physiker vom Fach als auch für die Fernerstehenden von unschätzbarem Wert ist." (Die Welt der Technik.)

CHEMIE

Unter Redaktion von **E. v. Meyer.** (Teil III, Abt. III. Bd. 2.)

ALLGEMEINE KRISTALLOGRAPHIE UND MINERALOGIE

Unter Redaktion von **Fr. Rinne**

Mit 53 Abbildungen Lex.-8. Geh. M. 18.–, geb. M. 34.–, in Halbfranz geb. M. 40.–

Inhaltsübersicht: Entwicklung der Chemie von Robert Boyle bis Lavoisier (1660—1793) von E. v. Meyer. — Die Entwicklung der Chemie im 19. Jahrhundert durch Begründung und Ausbau der Atomtheorie von E. v. Meyer. — Anorganische Chemie von C. Engler und L. Wöhler. — Organische Chemie von O. Wallach. — Physikalische Chemie von R. Luther und W. Nernst. — Photochemie von R. Luther. — Elektrochemie von M. Le Blanc. — Beziehungen der Chemie zur Physiologie von A. Kossel. — Beziehungen der Chemie zum Ackerbau von † O. Kellner und H. Immendorf. — Wechselwirkungen zwischen der chemischen Forschung und der chemischen Technik von O. N. Witt. — Allgemeine Kristallographie und Mineralogie von Fr. Rinne.

NATURPHILOSOPHIE

Unter Redaktion von **C. Stumpf.** Bearbeitet von **E. Becher.** (Teil III, Abt. VII, 1.)

Geh. M. 14.—, geb. M. 18.—, in Halbfranz geb. M. 24.—

Inhalt: Einleitung. Aufgabe der Naturphilosophie. Naturerkenntnistheorie. Gesamtbild der Natur.

„Es ist dem Verfasser gelungen, in klarer, anregender, für jeden Gebildeten verständlicher Weise seinen Stoff vorzutragen. Nirgends, auch bei der Erörterung der schwierigsten Probleme nicht, verliert er sich in weitschweifigen Erörterungen; immer weiß er die hauptsächlichsten Meinungen scharf und präzis hervorzuheben, daß wir ein klares Bild von dem gegenwärtigen Stande unserer Naturerkenntnis erhalten. So ist dies Buch jedem zu empfehlen. . . ." (Nord und Süd.)

Auf sämtl. Preise Teuerungszuschläge des Verlags (ab April 1920 100%, Abänder. vorbeh.) u. der Buchhandl.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Himmelsbild und Weltanschauung im Wandel der Zeiten. Von Prof. Troels-Lund. Deutsch von L. Bloch. 4. Aufl. Geb. M. 7.50

Physik und Kulturentwicklung durch techn. und wissenschaftl. Erweiterungen der menschlichen Naturanlagen. Von Geh. Hofrat Prof. Dr. O. Wiener. Mit 72 Abbildungen. 2. Aufl. Geh. M. 6.—, geb. M. 8.80

Lehrbuch der praktischen Physik. Von Prof. Dr. Fr. Kohlrausch, weil. Präsident der physikalisch-technischen Reichsanstalt zu Berlin. 13., stark. verm. Aufl. Neubearbeitet von H. Geiger, E. Grüneisen, L. Holborn, K. Scheel herausgegeben von E. Warburg.

Erkenntnistheorie und Physik. Von Prof. Dr. E. Gehrcke. [U. d. Pr. 1920.]

Physikalisches über Raum und Zeit. Von Dr. E. Cohn, Professor an der Universität Rostock i. M. 4. Aufl. Geh. M. 1.60

Einführung in die Relativitätstheorie. Von Dr. W. Bloch in Berlin. 2., verb. Aufl. Mit 18 Figuren. Kart. M. 2.80, geb. M. 3.50

Das Relativitätsprinzip. Leichtfaßlich entwickelt von A. Angersbach, Professor am Staatl. Gymnasium zu Weilburg. Kart. M. 2.—

Raum, Zeit und Relativitätslehre. Gemeinverständl. Vorträge von Dr. L. Schlesinger, Professor an der Universität Gießen. Mit 2 Tafeln und 5 Figuren. Geh. M. 2.80

Das Relativitätsprinzip. Eine Einführung in die Theorie von Dr. A. von Brill, Professor an der Universität Tübingen. 4. Aufl. Mit 6 Figuren im Text. Geh. M. 2.80

Das Relativitätsprinzip. Drei Vorlesungen gehalten in Teylers Stiftung zu Haarlem. Von Dr. H. A. Lorentz, Kurator des physik. Laborotoriums. Deutsch von Dr. W. H. Keesom. Geh. M. 2.—

Das Relativitätsprinzip. Eine Sammlung von Abhandlungen. Von Dr. H. A. Lorentz, Kurator des physikalischen Laboratoriums in Haarlem, Dr. A. Einstein, Professor am Kaiser-Wilhelm-Institut für physikalische Chemie, Berlin, Prof. Dr. H. Minkowski. Mit Anmerkungen von Dr. A. Sommerfeld, Professor an der Universität München und Vorwort von Dr. O. Blumenthal, Professor an der Technischen Hochschule Aachen, und 1 Bildnis H. Minkowskis. 3., verb. Aufl. Geh. M. 10.—, geb. M. 12.—

Das Prinzip der Erhaltung der Energie. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. M. Planck. 3. Aufl. Geb. M. 7.—

Erkenntnistheoretische Grundzüge der Naturwissenschaften und ihre Beziehungen zum Geistesleben der Gegenwart. Von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. P. Volkmann. 2. Aufl. Geb. M. 6.—

Wissenschaft und Religion in der Philosophie unserer Zeit. Von E. Boutroux. Deutsch von E. Weber. Mit Einführungswort von H. Holtzmann. Geb. M. 6.—

Das Wissen der Gegenwart in Mathematik und Naturwissenschaften. Von E. Picard. Deutsch von F. und L. Lindemann. Geh. M. 5.—, geb. M. 7.—

Über das Wesen der Mathematik. Von Geh. Hofrat Prof. Dr. A. Voß. 2. Aufl. Geh. M. 4.—

Scherz und Ernst in der Mathematik. Geflügelte und ungeflügelte Worte. Von Dr. W. Ahrens. 2. Aufl. [U. d. Pr. 1920.]

Mathematische Unterhaltungen und Spiele. Von Dr. W. Ahrens. 2. Aufl. 2 Bde. I. Bd. Mit 209 Fig. Geb. M. 11.—. II. Bd. Mit 128 Figuren. Geh. M. 14.—, geb. M. 15.—

Antike Technik. Von Geh. Oberreg.-Rat Prof. Dr. H. Diels. 2. Aufl. Mit 78 Abbildungen, 18 Tafeln und 1 Titelbild. Geh. M. 9.—, geb. M. 11.—

Teubners kleine Fachwörterbücher geben klare und zuverlässige Auskunft über alle wichtigen Gegenstände und Fachausdrücke.

Bisher erschienen: **Philosophisches Wörterbuch.** Von Dr. P. Thormeyer. 2. Aufl. (Bd. 4). Geb. M. 7.—. **Psychologisches Wörterbuch.** Von Dr. Fr. Giese. (Bd. 7.) Geb. M. 7.—. **Zoologisches Wörterbuch.** Von Dr. Th. Knottnerus-Meyer. (Bd. 2.) Geb. M. 8.—. **Botanisches Wörterbuch.** Von Dr. O. Gerke. (Bd. 1.) Geb. M. 8.—. **Physikalisches Wörterbuch.** Von Prof. Dr. G. Berndt. (Bd. 5.) Geb. M. 7.—. **Geologisch-mineralogisches Wörterbuch.** Von Dr. C. W. Schmidt. (Bd. 6.) **Geographisches Wörterbuch.** Von Prof. Dr. O. Kende. (Bd. 8.) **Wörterbuch der Warenkunde.** Von Prof. Dr. M. Pietsch. (Bd. 3.) Geb. M. 9.—. **Handelswörterbuch.** Von Dir. Dr. V. Sittel und Justizrat Dr. M. Strauß. (Bd. 9.) (Weitere Bände in Vorbereitung.)

Auf sämtliche Preise Teuerungszuschläge des Verlags (ab April 1920 100%, Abänd. vorbehalt.) u. teilw. d. Buchhandl.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

Infolge eines Versehens der Druckerei wurden die Register dem Bandredakteur nicht zur Korrektur vorgelegt, so daß eine Anzahl Druckfehler in denselben stehen geblieben sind, um deren Verbesserung gebeten wird.

Seite			
632,3	Zeile	31	v. u. lies Herakleides 35, 218 Heraklit 1, 39
633,2	„	19	v. u. lies Morvan, Le
634,3	„	16	v. u. statt 259 lies 269
635,1	„	17	v. u. lies Antalgolsterne
635,2	„	9	v. u. statt ξ lies ζ
636,1	„	31	v. u. einzuschalten Exeligmos 33
636,1	„	30	v. u. statt Exentrizität lies Exzentrizität
636,2	„	17	v. o. statt ξ lies ζ
636,2	„	22	v. o. lies Geoid 191 Georgsharfe 146
636,2	„	4	v u. statt μ lies u
636,3	„	28	v. u. einzuschalten Jobeljahr 82
637,1	„	27	v. o. statt 42 lies 421
637,1	„	30	v. o. lies Längenbestimmung
637,2	„	23	v. o. statt ξ lies ζ

Seite			
637,2	Zeile	1	v. u. statt Nâse lies Nâsi
637,3	„	17	v. o. statt 87 lies 85
637,3	„	29	v. o. statt 1911 lies 1912
637,3	„	27	v. u. statt 361 lies 391
638,1	„	34	v. u. statt 221 lies 261
638,1	„	13	v. u. 121 zu streichen
638,1	„	2	v. u. statt ξ lies ζ
638,2	„	16	v. o. statt Retrogad lies Retrograd
639,1	„	7	v. u. statt Thetis lies Tethys (eigenmächtige Änderung des Setzers)
639,2	„	4	v. o. lies Trabanten = Monde

Im Text fand sich nachträglich bisher nur der eine Fehler:

410 Zeile 11 v. u. statt Lac. lies Lal.

Himmelsbild und Weltanschauu
Lund. Deutsch von L. Bloch. 4. Aufl

Physik und Kulturentwicklung
menschlichen Naturanlagen. Von Geh. 1
2. Aufl. Geh. M. 6.—, geb. M. 8.80

Lehrbuch der praktischen Physi
der physikalisch-technischen Reichsanstalt
H. Geiger, E. Grüneisen, L. Holbor

Erkenntnistheorie und Physik.

Physikalisches über Raum und Z
Rostock i. M. 4. Aufl. Geh. M. 1.60

Einführung in die Relativitätsthe
Mit 18 Figuren. Kart. M. 2.80, geb. M.

Das Relativitätsprinzip. Leichtfaß
Staatl. Gymnasium zu Weilburg. Kart.

Raum, Zeit und Relativitätslehre
Professor an der Universität Gießen. M

Das Relativitätsprinzip. Eine Ei
Professor an der Universität Tübingen.

Das Relativitätsprinzip. Drei Vorles
H. A. Lorentz, Kurator des physik. Labo

Das Relativitätsprinzip. Eine Sam
Kurator des physikalischen Laboratorium
Wilhelm-Institut für physikalische Chemie
von Dr. A. Sommerfeld, Professor
O. Blumenthal, Professor an der Tec
kowskis. 3., verb. Aufl. Geh. M. 10.—,

Das Prinzip der Erhaltung der
3. Aufl. Geh. M. 7.—

Erkenntnistheoretische Grundzü
zum Geistesleben der Gegenwart. Von Gel

Wissenschaft und Religion in de
Deutsch von E. Weber. Mit Einführun

Das Wissen der Gegenwart in
E. Picard. Deutsch von F. und L. Li

Über das Wesen der Mathematik.

Scherz und Ernst in der Mathe
W. Ahrens. 2. Aufl. [U. d. Pr. 1920

Mathematische Unterhaltungen
I. Bd. Mit 209 Fig. Geb. M. 11.—. II. Bd. Mit 128 Figuren. Geh. M. 14.—, geb. M. 15.—

Antike Technik. Von Geh. Oberreg.-Rat Prof. Dr. H. Diels. 2. Aufl. Mit 78 Abbildungen, 18 Tafeln und 1 Titelbild. Geh. M. 9.—, geb. M. 11.—

Teubners kleine Fachwörterbücher geben klare und zuverlässige Auskunft über alle wichtigen Gegenstände und Fachausdrücke.

Bisher erschienen: **Philosophisches Wörterbuch.** Von Dr. P. Thormeyer. 2. Aufl. (Bd. 4). Geb. M. 7.—. **Psychologisches Wörterbuch.** Von Dr. Fr. Giese. (Bd. 7.) Geb. M. 7.—. **Zoologisches Wörterbuch.** Von Dr. Th. Knottnerus-Meyer. (Bd. 2.) Geb. M. 8.—. **Botanisches Wörterbuch.** Von Dr. O. Gerke. (Bd. 1.) Geb. M. 8.—. **Physikalisches Wörterbuch.** Von Prof. Dr. G. Berndt. (Bd. 5.) Geb. M. 7.—. **Geologisch-mineralogisches Wörterbuch.** Von Dr. C. W. Schmidt. (Bd. 6.) **Geographisches Wörterbuch.** Von Prof. Dr. O. Kende. (Bd. 8.) **Wörterbuch der Warenkunde.** Von Prof. Dr. M. Pietsch. (Bd. 3.) Geb. M. 9.—. **Handelswörterbuch.** Von Dir. Dr. V. Sittel und Justizrat Dr. M. Strauß. (Bd. 9.) (Weitere Bände in Vorbereitung.)

Auf sämtliche Preise Teuerungszuschläge des Verlags (ab April 1920 100%, Abänd. vorbehalt.) u. teilw. d. Buchhandl.

Verlag von B. G. Teubner in Leipzig und Berlin

177231 Astron. H.

Author Hartmann, J. [ed.]

Title Astronomie.

University of Toronto Library

DO NOT REMOVE THE CARD FROM THIS POCKET

Acme Library Card Pocket
Under Pat. "Ref. Index File"
Made by LIBRARY BUREAU